

Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion

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

von

Dipl.-Ing. Philipp Sebastian Halata

aus

Hamburg

2018

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Februar 2018

Wissen schafft Innovation

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg-Harburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 35:

Philipp Sebastian Halata

Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung
für die Unikatproduktion

1. Auflage

Hamburg 2018

ISSN 1613-8244

Copyright Philipp Sebastian Halata 2018

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts und meinem Hauptgutachter Herrn Professor Hermann Lödding für seine Unterstützung, seine fachlichen Anregungen, die eingeräumten thematischen und arbeitstechnischen Freiräume am Institut sowie die angenehm unkomplizierte Kommunikation. Herrn Professor Jochen Deuse danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Professor Sören Ehlers. Darüber hinaus danke ich dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie der Technischen Universität Hamburg-Harburg für die überdurchschnittlich guten Rahmenbedingungen.

Ich danke meinen ehemaligen Kollegen am Institut für das angenehme Arbeitsklima und die hervorragende Zusammenarbeit. Speziell danke ich Herrn Andreas Piontek für sein konstruktives Feedback und unzählige motivierende Sporteinheiten sowie Herrn Martin Benter für Ablenkung bei Currywurst und für den wertvollen Hinweis, Tabellen in PowerPoint zu erstellen. Herrn Dr. Fjodor Titov und Herrn Dr. Florian Tietze danke ich für die wertschätzende, freundschaftliche und überaus ergiebige Zusammenarbeit im Forschungsprojekt PROSPER, aus dem die Inhalte für meine Dissertation entstanden sind, die nun die Grundlage für unsere gemeinsam gegründete Firma bilden.

Mein besonderer Dank für sein enormes persönliches Engagement gilt Herrn Dr. Axel Friedewald, dessen Hartnäckigkeit und dessen nicht selten unbequeme inhaltliche Kommentare sowohl mir als auch der Qualität dieser Arbeit gutgetan haben. Darüber hinaus danke ich allen Studenten, die mich während meiner Promotionszeit begleitet haben, – insbesondere Frau Lea-Nadine Schwede, Herrn Alexander Hillmer, Herrn Ian Dikhof und Herrn Tim Bodenstein für die Unterstützung bei der Gestaltung und Umsetzung der Software-Prototypen. Herrn Nikolaj Meluzov danke ich für sein überdurchschnittliches Engagement bei der Evaluation und für zahlreiche fachliche und nichtfachliche Gespräche.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Freunden und Verwandten, die mich während meiner Promotionszeit begleitet, unterstützt und in der Abschlussphase vor allem ertragen haben. Besonders danke ich meiner Mutter Barbara Halata für ihre unglaubliche Akribie beim wiederholten Korrekturlesen dieser Arbeit sowie meinem Vater Zdeněk Halata. Beide haben auf ihre Weise die Grundsteine für meine Promotion gelegt.

Hamburg im März 2018

Philipp Sebastian Halata

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Fertigungsinformationen	5
2.1.1	Informationsversorgung in der Unikatproduktion	6
2.1.2	Produktaufbau und Informationskategorien	7
2.2	Augmented Reality	9
2.2.1	Anzeigehardware	10
2.2.2	Visualisierung von Informationen mit AR	11
2.2.3	Tracking	13
2.2.4	Augmented Reality in der Industrie	17
2.2.5	Defizite, Anwendungsfälle und Potenziale	21
2.3	Prozessinnovationen	22
2.3.1	Kosten und Produktivität	22
2.3.2	Messung von Personalproduktivität	23
2.3.3	Qualität	24
2.3.4	Zeit	25
3	Informationsversorgung in der Unikatproduktion	27
3.1	Analyse der Informationsversorgung	27
3.1.1	Informationsprozess	28
3.1.2	Modell suboptimaler Informationsbereitstellung	29
3.1.3	Produktivitätsaspekte	30
3.1.4	Qualitätsaspekte	36
3.2	Informationsdefizite in der Unikatproduktion	38
3.2.1	Defizite der papierbasierten Informationsbereitstellung	39
3.2.2	Rückmeldung von Informationen	41
3.2.3	Defizite digitaler Informationsbereitstellung	41
3.3	Abschätzung der Potenziale in der Informationsversorgung	43
3.3.1	Allgemeine Potenziale	43
3.3.2	Technologiespezifische Potenziale	46
3.3.3	Technologieauswahl	48
3.4	Anforderungen an die AR-gestützte Informationsversorgung	51
3.4.1	Verbesserung der Informationsversorgung	51
3.4.2	Produktive Nutzung digitaler Arbeitsunterlagen	52
3.4.3	Akzeptanz	53

4	Konzept für eine digitale Arbeitsunterlage	55
4.1	Überblick über das Konzept	55
4.1.1	Mobile Anwendung	55
4.1.2	Zentraler Server	57
4.1.3	Grundvoraussetzungen für den Einsatz	57
4.1.4	Anwendungsbeispiele	58
4.2	Informationsanzeige	60
4.2.1	Verknüpfung und Darstellung der Informationen	60
4.2.2	Informationsbedarf und Kategorisierung	63
4.2.3	Informationsumfang und -zeitpunkt	71
4.3	Benutzeroberfläche	73
4.3.1	Informationsdarstellung	74
4.3.2	Ablaufsteuerung	76
4.3.3	Inhaltsauswahl	79
4.3.4	Umschalten der Modi	82
4.3.5	Anwendungsbeispiele	83
4.3.6	CAD-Modus	85
4.4	Werkzeuge	88
4.4.1	Automatische Bemaßung	89
4.4.2	Reihenfolgebildung	96
4.4.3	Arbeitsschrittgruppierung	98
4.4.4	Automatische Ausrichtung der Ansicht	101
4.5	Trackingbaukasten	104
4.5.1	Kontinuierliches Tracking	105
4.5.2	Feininitialisierung	106
4.5.3	Grobinitialisierung	108
4.6	Datenorganisation und -übertragung	110
4.6.1	Datenmodell	110
4.6.2	Datenbereitstellung	114
4.6.3	Datensicherheit	116
4.6.4	Arbeitspaketauswahl	118
4.6.5	Datenauswahl	120
4.6.6	Datenübertragung	122
4.6.7	Datenaktualisierung	123
4.6.8	Rückmeldedaten	124

5	Validierung der digitalen Arbeitsunterlage	125
5.1	Eignungstests in Industrieszenarien	126
5.1.1	Schiffbau	126
5.1.2	Schaltschrankmontage	129
5.2	Systematische Versuche in einer Laborumgebung	131
5.2.1	Statistische Betrachtung	132
5.2.2	Montage	135
5.2.3	Qualitätskontrolle	137
5.2.4	Benutzeroberfläche	139
5.2.5	Bemaßungswerkzeug	140
5.2.6	Flugmodus-Werkzeug	141
5.2.7	Datenübertragung	142
5.3	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	143
6	Schlussbetrachtung	145
6.1	Zusammenfassung	145
6.2	Ausblick	146
	Literatur	149
	Lebenslauf	157

Verzeichnis der Formelzeichen

A	Ausschuss eines Prozesses
L_F	Anzahl fehlerhaft produzierter Leistungseinheiten
L_{Ges}	Anzahl gesamt produzierter Leistungseinheiten
$L_{F,Info}$	Anzahl aufgrund der Informationslage fehlerhafter Leistungseinheiten
$L_{F,Rest}$	Anzahl aufgrund anderer Ursachen fehlerhafter Leistungseinheiten
P	Produktivität
P_p	Personalproduktivität
<i>Output</i>	produzierte Leistungseinheiten
<i>Input</i>	eingesetzte Ressourcen
T_{Info}	Gesamtzeit für Informationstätigkeiten
T_{Rest}	Gesamtzeit für andere Tätigkeiten
$t_{Info,n}$	Zeit für den gesamten Informationsprozess (für eine Information n)
t_{IG}	Zeit für die Informationserstellung
t_{IS}	Zeit für die Informationssuche
t_{IB}	Zeit für die Informationsbeschaffung
t_{IE}	Zeit für die Informationserfassung
t_{II}	Zeit für die Informationsinterpretation
$t_{II,alt}$	Zeit für die Informationsinterpretation mit herkömmlichem Prozess
$t_{II,neu}$	Zeit für die Informationsinterpretation mit innoviertem Prozess
$\bar{t}_{Ix}$	durchschnittliche Zeit für die Informationsphase x
N_{Info}	Anzahl benötigter Informationen
N_{IA}	Anzahl der Informationsaufrufe
$P(I)$	Wahrscheinlichkeit für die Relevanz der Information
$K_{indirekt}$	Stundenlohn eines Mitarbeiters im indirekten Bereich
K_{direkt}	Stundenlohn eines Mitarbeiters im direkten Bereich
μ_x	Mittelwert für das zum Vergleich stehende Informationsmedium x
μ_y	Mittelwert für das Referenz-Informationsmedium y
$\mu_{x,y}$	Differenz der Mittelwerte für Informationsmedien x und y
$\mu_{x/y}$	Quotient der Mittelwerte für Informationsmedien x und y
$I_x = [u_x, o_x]$	Konfidenzintervall des Mittelwerts für Informationsmedium x
$I_{x,y} = [u_{x,y}, \infty[$	einseitiges Konfidenzintervall für die Differenz der Mittelwerte
$I_{x/y} = [u_{x/y}, \infty[$	einseitiges Konfidenzintervall für den Quotienten der Mittelwerte

ANOVA	Analysis of Variance
AR	Augmented Reality
BPMN	Business Process Model and Notation
CAD	Computer-aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMU	Digital Mock-up
E-CAD	Electronic Computer-aided Design
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ER	Entity-Relationship
ERP	Enterprise Resource Planning
HMD	Head-mounted Display
HUD	Head-up Display
ID	Identifier
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ISO	International Organization for Standardization
JSON	JavaScript Object Notation
MDM	Mobile Device Management
MMH	Multimomenthäufigkeitsverfahren
MTL	Material Template Library
MTM	Methods-Time Measurement
NFC	Near-field Communication
PDF	Portable Document Format
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
QR	Quick Response
RFID	Radio-frequency Identification
TOM	Tätigkeits-Objekt-Matrix
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network
XML	Extensible Markup Language

Abb. 1	Aufbau der Arbeit	3
Abb. 2	Vereinfachte Darstellung des Informationsflusses in der Produktion	5
Abb. 3	Überblick über die Merkmale der Unikatproduktion	6
Abb. 4	Exemplarischer Aufbau eines Produkts	8
Abb. 5	Datenquellen und die jeweils erzeugten Daten	8
Abb. 6	Mediated-Reality-Kontinuum	9
Abb. 7	Einteilung von AR-Geräten nach Position und Art der Vermischung	10
Abb. 8	Einblendung eines Rohres ohne und mit Occlusion-Geometrien	13
Abb. 9	Funktionsprinzipien von absolutem und inkrementellem Tracking	14
Abb. 10	Funktionsprinzipien von Outside-In- und Inside-Out-Tracking	15
Abb. 11	Überblick über die Vor- und Nachteile bestehender Trackingverfahren	17
Abb. 12	Überblick über eine Auswahl bestehender industrieller AR-Anwendungen	18
Abb. 13	Vergleich des Informationsprozesses mit der Informationsphase nach Tietze	28
Abb. 14	Auswirkungen unzulänglicher Informationen	29
Abb. 15	Mitarbeiterzustände in der schiffbaulichen Fertigung und Zeitanteile	32
Abb. 16	Abschätzung der Anteile der Informationsphasen	33
Abb. 17	Aufwand für Informationstätigkeiten im Schiffbau	34
Abb. 18	Aufwand für Informationstätigkeiten in der Schaltschrankmontage	35
Abb. 19	Verknüpfung zwischen häufig auftretenden Fehlern und Ursachen	37
Abb. 20	Für Fehler verantwortliche Informationen nach Aufwand	38
Abb. 21	Ursachenanalyse für fehlende Informationen	40
Abb. 22	Potenziale durch Aktualität und Verfügbarkeit der Informationen	44
Abb. 23	Potenziale durch Kontextbewusstheit der Informationsanwendung	44
Abb. 24	Potenziale durch dynamische, interaktive Darstellung	45
Abb. 25	Potenziale durch Darstellung in Relation zur realen Umgebung	45
Abb. 26	Potenziale durch automatische Berechnung und Aufbereitung	46
Abb. 27	Technologiespezifische Potenziale von Laserprojektoren	47
Abb. 28	Technologiespezifische Potenziale von Tablet-Computern	47
Abb. 29	Technologiespezifische Potenziale von Head-Mounted-Displays	48
Abb. 30	Gegenüberstellung einer Zustandsverteilung und Schlüsselaktivitäten	49
Abb. 31	Gegenüberstellung einer Fehlerauswertung und Schlüsselinformationen	50
Abb. 32	Übersicht über den Aufbau des Systems	55
Abb. 33	Aufbau der mobilen Anwendung	56
Abb. 34	Aufbau eines exemplarischen Schaltschranks	58
Abb. 35	Teil einer Schiffssektion nach der Ausrüstung	59
Abb. 36	Informationszwecke und deren Zusammenhänge	61

Abb. 37	Mögliche Darstellungsformen geometrischer und zeitlicher Bezugsformen	62
Abb. 38	Exemplarischer Entwurf einer Informationsanzeige	63
Abb. 39	Einteilung des Informationsbedarfs in Unikatanteil und Wiederholanteil	64
Abb. 40	Mögliche Punkte der Informationsaufbereitung	67
Abb. 41	Vergleich des Aufbereitungsgrades der Information <i>Halterposition</i>	68
Abb. 42	Aufwände für Informationsinterpretation und Informationserstellung	69
Abb. 43	Aufwand und Nutzungshäufigkeit als Entscheidungshilfe für die Darstellung	71
Abb. 44	Vergleich der Methoden zur Informationssteuerung	72
Abb. 45	Bedienbereiche des Geräts für beide Hände	74
Abb. 46	Visualisierungsbereich auf gesamter Bildschirmfläche	75
Abb. 47	Entwicklung der Darstellung der Ablaufsteuerung	77
Abb. 48	Positionierung des transparenten Ablaufbereichs	79
Abb. 49	Schaltfläche für Inhaltsauswahl für die Information <i>Bemaßung</i>	80
Abb. 50	Inhaltsauswahl für kontinuierlich genutzte Informationen	80
Abb. 51	Schaltflächen des Navigationsbereichs	82
Abb. 52	Finale Benutzeroberfläche mit Navigationsbereich und CAD-/AR-Umschalter	82
Abb. 53	Benutzeroberfläche für die Sektionsausrüstung des Schiffbaus im AR-Modus	83
Abb. 54	Benutzeroberfläche für die Schaltschrankmontage im AR-Modus	84
Abb. 55	Touch-Gesten zur Ausrichtung der 3D-Ansicht	86
Abb. 56	Benutzeroberfläche für die Sektionsausrüstung des Schiffbaus im CAD-Modus	87
Abb. 57	Definition der Bezeichnungen für die automatische Bemaßung	90
Abb. 58	Bemaßung bei unterschiedlicher Arbeitsweise und Reihenfolge	91
Abb. 59	Überblick über die Berechnung und Anzeige der Bemaßung	92
Abb. 60	Ablauf der Berechnung möglicher Messwege	92
Abb. 61	Für die Bemaßung verwendete CAD-Primitive	93
Abb. 62	Flächentypen der Primitive mit Messrichtung und Stützpunkt	93
Abb. 63	Messrichtungen, die eine Fläche zur Verfügung stellt	94
Abb. 64	Ablauf der Auswahl geeigneter Messwege	95
Abb. 65	Ablauf der Auswahl der Sortierparameter	97
Abb. 66	Geometrische Reihenfolgebildung	97
Abb. 67	Ablauf der Sortierung	98
Abb. 68	Ablauf der Arbeitsschrittgruppierung	99
Abb. 69	Ablauf der Berechnung der Gruppierung	99
Abb. 70	Parameterbasierte Arbeitsschrittgruppierung und virtuelle Arbeitsschritte	100
Abb. 71	Ablauf des Werkzeugs Flugmodus	103
Abb. 72	Animierte Sequenz des Flugmodus	103

Abb. 73	Aufbau und Funktionsweise des Trackingbaukastens	105
Abb. 74	Beispiele für verbundene Marker und Marker an Vorzugspositionen	107
Abb. 75	Mehrdeutigkeit der Ansicht bei Kantentracking	108
Abb. 76	Vergleich der Methoden zur Feininitialisierung	108
Abb. 77	Indikatoren und darin enthaltene Informationen	109
Abb. 78	Funktionsweise des Trackingbaukastens in der Sektionsausrüstung	110
Abb. 79	Speicherung der Daten in vorgelagerter Datenbank und Direktzugriff	111
Abb. 80	Schematische Darstellung des Produktabbilds	112
Abb. 81	Schematische Darstellung der Produktionsdaten mit dem Produktabbild	113
Abb. 82	Schematische Darstellung der Organisationsdaten	114
Abb. 83	Schematische Darstellung des gesamten Datenmodells	114
Abb. 84	Drei Punkte der Datensicherheit: auf Server, bei Übertragung, auf Endgerät	116
Abb. 85	Beispiele für die Interpretation eines Arbeitspakets: Zusammenbau und Einbau	121
Abb. 86	Einteilung der Informationen in primäre und sekundäre Daten	122
Abb. 87	Beurteilungsparameter für Übertragungsstrategie	123
Abb. 88	Anforderungen und Zuordnung zu Versuchen, Messmethoden und -parametern	125
Abb. 89	Ausgerüstete Testumgebung und Arbeitsinhalt	126
Abb. 90	Parameter der drei Versuchsdurchläufe im Schiffbau	126
Abb. 91	Ergebnisse der Befragung der Versuchsteilnehmer	128
Abb. 92	Fertigungsmitarbeiter beim Soll-Ist-Abgleich mit AR	128
Abb. 93	Parameter der drei Versuchsdurchläufe in der Schaltschrankmontage	129
Abb. 94	Ergebnisse der Prozessablaufanalysen in der Schaltschrankmontage	130
Abb. 95	Überblick über die Laborversuche und die jeweils eingesetzten Messmethoden	132
Abb. 96	Konfidenzintervalle der Mittelwerte der Bearbeitungsdauern	134
Abb. 97	Konfidenzintervall der Differenz der Mittelwerte	134
Abb. 98	LEGO-Modelle in drei Komplexitätsstufen	136
Abb. 99	Auswertung der Ergebnisse in Versuch L1	137
Abb. 100	LEGO-Modell für die Qualitätskontrolle	138
Abb. 101	Auswertung der Ergebnisse in Versuch L2	138
Abb. 102	Auswertung der Ergebnisse in Versuch L3	139
Abb. 103	Auswertung der Ergebnisse in Versuch L4	141
Abb. 104	Auswertung der Ergebnisse in Versuch L5	142
Abb. 105	Datenübertragungsdauern in den Anwendungsbeispielen	143
Abb. 106	Durchgeführte Versuche und die darin bewerteten Anforderungen	144

1 Einleitung

Um dem Wettbewerbsdruck standzuhalten, spezialisieren sich viele Unternehmen in Hochlohnländern darauf, komplexe kundenindividuelle Produkte herzustellen. Die Produktion solcher sogenannten Unikate und unikatähnlicher Produkte führt zu Herausforderungen in der Planung und der Ausführung: Während die Serienproduktion einen möglichst hohen Automatisierungsgrad und eine feingranulare Planung der Arbeitsschritte anstrebt, um eine hohe Produktivität und Prozessqualität zu erreichen, steht der hohe Aufwand hierfür bei Unikaten selten in einer wirtschaftlichen Relation zum Nutzen, da jeder optimierte Arbeitsschritt nur einmalig auftritt. Die geringere Planungstiefe führt dazu, dass sich kognitive Vorgänge, wie die Erstellung einer Plan-Reihenfolge oder die Ableitung von notwendigen Arbeitsschritten aus einer Zeichnung, von den indirekten Bereichen in die direkten Bereiche verlagern. Zusätzlich besteht in der Unikatfertigung ein erhöhter Bedarf an Fertigungsinformationen, da Wiederholtätigkeiten und ein damit verbundenes Verinnerlichen von Arbeitsschritten selten sind.

Die Informationsversorgung der direkten Bereiche erfolgt dabei in der Regel per Ausdruck auf Papier, das als statisches Informationsmedium charakteristische Nachteile mit sich bringt, die besonders dann zum Tragen kommen, wenn der Aufwand begrenzt ist, der in die Aufbereitung der Informationen fließen kann: Große Mengen an Arbeitsinhalt sind gesammelt in einer Zeichnung dargestellt, sodass die Übersichtlichkeit leidet, komplexe dreidimensionale Sachverhalte sind auf eine zweidimensionale Darstellung heruntergebrochen, Informationen abstrakt dargestellt, um Platz zu sparen, Informationsfragmente über mehrere Dokumente verteilt. In Summe führt dies zu einem gegenüber der Serienfertigung deutlich erhöhten Anteil an Informationstätigkeiten von bis zu einem Drittel der Gesamtarbeitszeit, die per se nicht wertschöpfend sind [Tiet17, S. 97]. Entsprechend hoch ist das Produktivitätspotenzial, das eine verbesserte Versorgung direkter Bereiche mit Fertigungsinformationen erschließen kann.

Mobile Endgeräte wie Tablet-Computer oder Datenbrillen mit hochauflösender Anzeige und hoher Rechenleistung können Fertigungsinformationen dynamisch darstellen und sind damit eine Alternative zum statischen Papierausdruck, die wesentliche Vorteile aufweist: Informationen lassen sich in einem arbeitsschrittgerechten Umfang darstellen, interaktive dreidimensionale Darstellungen können komplexe Geometrien besser verdeutlichen und die digitale Informationsweitergabe ermöglicht es, nahezu unbegrenzt viele Informationen zur Hand zu haben. Zudem lassen sich Informationen mit Augmented Reality (AR) geometrisch korrekt in die reale Umgebung einblenden, wodurch eine weitere Abstraktionsebene bei der Umsetzung der Information entfällt.

Bestehende Lösungen – sowohl für digitale Arbeitsunterlagen als auch für Augmented-Reality-gestützte Fertigungsinformationen – zeigen deren Potenzial auf, sind jedoch nicht

in der Lage, die komplexen und dabei hochflexiblen Arbeitsprozesse der Unikatfertigung abzubilden. Die zugrundeliegenden Konzepte messen dem Aufwand für die wiederkehrende Informationsaufbereitung wenig Gewicht bei und nehmen somit zugunsten einer verbesserten Informationslage in den direkten Bereichen einen Mehraufwand in den indirekten Bereichen in Kauf. Der Gesamtnutzen für das Unternehmen, betrachtet über indirekte und direkte Bereiche hinweg, bleibt hierbei unberücksichtigt und ist schlimmstenfalls sogar negativ. Zusammenfassend existiert bis dato keine Anwendung, die eine effiziente Informationsversorgung für die Produktion von Unikaten ermöglicht.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Konzept für ein System zu entwerfen, das die Informationsversorgung in den direkten Bereichen der Unikatproduktion mithilfe mobiler Endgeräte vereinfacht. Ein Prototyp für eine digitale Augmented-Reality-gestützte Anwendung zur Informationsversorgung soll die Potenziale des Konzepts in der Praxis aufzeigen und überprüfen. Die Arbeit verfolgt dabei drei Teilziele, die sich aus den Defiziten bestehender Lösungen ergeben und für den Erfolg in der Praxis notwendig sind:

Verbesserung der Informationsversorgung

Eine Anwendung auf einem mobilen Endgerät soll die papierbasierte Informationsversorgung ersetzen. Das Ziel ist es, die Zeit zu reduzieren, die Mitarbeiter der Fertigung derzeit für die Suche und Beschaffung von Informationen sowie für deren visuelle Erfassung und Interpretation aufwenden. Darüber hinaus soll die Anwendung Fehler verringern, die aufgrund fehlender, übersehener oder missverstandener Informationen entstehen. Hierfür sind die Verfügbarkeit der Informationen zu erhöhen, der Informationsumfang bedarfsgerecht zu gestalten und die Verständlichkeit der Darstellung zu verbessern.

Produktiver Einsatz digitaler Arbeitsunterlagen

Bestehende Anwendungen, die mit mobilen Endgeräten oder Augmented Reality Fertigungsinformationen vermitteln, sind nicht für einen produktiven Einsatz in der Unikatproduktion ausgelegt. Es sind deshalb sowohl Methoden zur effizienten Datenaufbereitung als auch Benutzerschnittstellen zu entwerfen, die hochflexible Arbeitsprozesse abbilden können und sich intuitiv bedienen lassen.

Akzeptanz

Für den Erfolg in der Praxis ist die Akzeptanz für die Lösung notwendig. Diese ergibt sich in erster Linie aus der Benutzerfreundlichkeit des Informationsmediums für die unmittelbaren Anwender, die Fertigungsmitarbeiter. Darüber hinaus sind weitere Kriterien für die Einsatztauglichkeit im Prozess (bspw. eine ausreichende Betriebszeit der Geräte) sowie die Datenanbindung und -sicherheit zu erfüllen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist angelehnt an den allgemeinen Problemlösungszyklus des Systems Engineering [Habe12, S. 76]. Abbildung 1 verdeutlicht die Gliederung.

Zielsuche	Kapitel 2: Stand der Technik • Fertigungsinformationen • Augmented Reality und digitale Arbeitsunterlagen • Prozessinnovationen
	Kapitel 3: Informationsversorgung in der Unikatfertigung • Analyse der Informationsversorgung und ihrer Defizite • Abschätzung der Potenziale in der Informationsversorgung • Definition der Anforderungen an das Konzept
Lösungssuche	Kapitel 4: Konzept für eine digitale Arbeitsunterlage • Aufbau eines Gesamtsystems • Darstellung von Informationen • Bedienkonzept der digitalen Arbeitsunterlage • Werkzeuge zur produktiven Nutzung • Trackingbaukasten für Augmented Reality • Datenbereitstellung und -übertragung
Bewertung	Kapitel 5: Validierung des Konzepts • Versuche im Schiffbau • Versuche in der Schaltschrankmontage • Laborversuche

13201

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Dieser erklärt die Erstellung und Distribution von Fertigungsinformationen und betrachtet Prozessinnovationen sowie Kriterien für die Beurteilung ihres Erfolgs. Die Funktionsweise von Augmented Reality sowie ein Syllabus bestehender Anwendungen in der Industrie runden das Kapitel ab.

Kapitel 3 analysiert die Informationsversorgung in der Unikatfertigung mit dem Fokus darauf aufzuklären, weshalb Informationstätigkeiten einen hohen Anteil an der Gesamtarbeitszeit der Fertigungsmitarbeiter haben, und deckt Defizite in der papierbasierten Informationsversorgung auf. Es folgen eine Abschätzung der Potenziale, die eine Verbesserung der Informationsversorgung verspricht, sowie die Anforderungen an das Konzept.

Kapitel 4 leitet ein Konzept für die Informationsversorgung mit digitalen Arbeitsunterlagen für Unikatprodukte her. Es zeigt den Aufbau des Systems auf und stellt die einzelnen Komponenten vor – die Basis-Anwendung der digitalen Arbeitsunterlage, Werkzeuge, die den produktiven Einsatz der Anwendung sicherstellen sollen, sowie die der Anwendung zugrundeliegende Datenbank.

Kapitel 5 überprüft das Konzept anhand des entstandenen Prototyps in realen Einsatzszenarien: der Sektionsausrüstung im Schiffbau und der Schaltschrankmontage. Weitere Versuche in einer Laborumgebung liefern statistisch fundierte Aussagen über mögliche Produktivitätsgewinne, Fehlervermeidung sowie die Benutzerfreundlichkeit der Anwendung und quantifizieren den Nutzen der Werkzeuge.

2 Grundlagen

Das vorliegende Kapitel beschreibt wesentliche Grundlagen, die zum Verständnis der Arbeit notwendig sind. Es teilt sich in drei Abschnitte auf: Fertigungsinformationen – mit besonderem Fokus auf der Informationserstellung und -versorgung in der Unikatproduktion – (Abschnitt 2.1), technologische Grundlagen zu Augmented Reality und Beispiele für deren Einsatz zur Fertigungsunterstützung (Abschnitt 2.2) sowie Prozessinnovationen und die Messung ihres Erfolgs (Abschnitt 2.3).

2.1 Fertigungsinformationen

In produzierenden Unternehmen findet eine Arbeitsteilung zwischen direkten und indirekten Bereichen statt. Während die direkten Bereiche – Fertigung und Montage – das physische Produkt erstellen, dienen die indirekten Bereiche dazu, sie mit Unterlagen, Informationen und Leistungen zu versorgen [Bull03, S. 459]. Das Hauptaugenmerk liegt in dieser Arbeit auf den direkten Bereichen sowie den vorgelagerten indirekten Bereichen Konstruktion und Arbeitsvorbereitung, die zusammen die technische Auftragsabwicklung bilden [Hier95, S. 51]. Die vorgelagerten Bereiche sind also die Erzeuger der Informationen, die direkten Bereiche die Abnehmer (Abbildung 2).

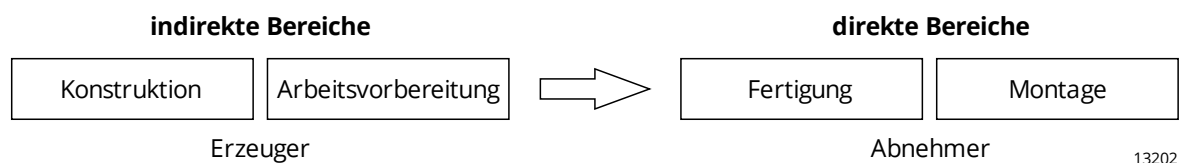


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des Informationsflusses in der Produktion

Während die Konstruktion den technischen Aufbau des Produkts vorgibt, legt die Arbeitsvorbereitung fest, auf welche Weise die direkten Bereiche das Produkt erzeugen [Tu11, S. 63]. Hierbei teilt sie das Gesamtprodukt in Arbeitspakete auf und leitet jeweils aus den von der Konstruktion erstellten Informationen – bspw. CAD-Modellen oder Schaltplänen – die Informationsträger ab, die die Mitarbeiter in den direkten Bereichen benötigen, um die notwendigen Fertigungs- bzw. Montageschritte auszuführen.

Als wichtigste Träger von Fertigungsinformationen gelten nach Hiersig Zeichnungen, Stücklisten sowie Arbeits- und Montagepläne [Hier95, S. 51]. Erstere beziehen sich auf das zu erzeugende Produkt (vgl. [DIN199]), letztere auf die zur Erzeugung des Produkts auszuführenden Arbeitsvorgänge. Die papierbasierte Informationsversorgung ist dabei Stand der Technik [West13, S. 134], z. T. gehen Unternehmen jedoch dazu über, den Fertigungsmitarbeitern die ursprünglich für den Ausdruck konzipierten Unterlagen in digitaler Form bereitzustellen – üblicherweise als PDF.

2.1.1 Informationsversorgung in der Unikatproduktion

Die Produktion von Unikaten oder Produkten mit Unikatcharakter unterscheidet sich in mehreren wesentlichen Aspekten von der Serienfertigung, die die Versorgung der direkten Bereiche mit Informationen zu einer zentralen Herausforderung machen. Die Merkmale der Unikatproduktion fasst Heinig [Hein15, S. 10ff.] anhand der von Schomburg [Scho80, S. 34ff.] und Wöhe [Wöhe08, S. 38] aufgestellten Systematik zur betriebstypologischen Klassifizierung zusammen (Abbildung 3).

Merkmale der Unikatproduktion		
produktbezogen	systembezogen	prozessbezogen
• Losgröße eins • hohe Komplexität	• geringe Automatisierung • hohe Flexibilität	• mangelnde Wiederholbarkeit • Simultaneous Engineering • kurzfristige Änderungen

13203

Abbildung 3: Überblick über die Merkmale der Unikatproduktion (vgl. [Hein15, S. 11ff.])

Der Einfluss dieser Charakteristika der Unikatproduktion auf die Menge, Verfügbarkeit und Verständlichkeit der Informationen ist im Folgenden dargestellt.

Informationsmenge

Fertigungsarten lassen sich anhand ihrer Losgröße voneinander unterscheiden [Hirs92, S. 4]. Die Losgröße ist bei der Fertigung von Unikaten in der Regel *eins*. Für die Informationsversorgung bedeutet dies, dass die Mitarbeiter eine Information über einen anstehenden Arbeitsschritt in der Regel genau einmal verwenden [Tu11, S. 21]. Im Vergleich zur Serienfertigung lässt sich der Informationsbedarf nur zu einem kleinen Teil durch Erfahrungswissen (verinnerlichte Arbeitsschritte) decken [Günt06, S. 75], da die meisten Informationen für die Mitarbeiter erstmalig auftreten.

Studien zum Erinnerungsvermögen zeigen zudem, dass Informationen mit verstreichender Zeit [Ebbi85] und bei mangelnder Wiederholung [Göld01, S. 93] in Vergessenheit geraten. Folglich besteht auch dann ein erhöhter Informationsbedarf, wenn die Mitarbeiter Produkte sehr selten oder in sehr hoher Variantenvielfalt fertigen.

Bei der Montage von Produkten geringer Stückzahl oder hoher Variantenvielfalt herrschen jedoch typischerweise manuelle Tätigkeiten vor, da sich eine Automatisierung in der Regel nicht lohnt [West13, S. 137], oder die Aufgaben zu komplex oder flexibel sind. Die Menge der Informationen, die Mitarbeiter der Fertigung interpretieren und in manuelle Arbeitsschritte umsetzen müssen, ist entsprechend groß.

Verfügbarkeit von Informationen

Um die Lieferzeit der Produkte zu verkürzen, können Unikatfertiger die Strategie des Simultaneous Engineering anwenden. Im Gegensatz zum sequentiellen Ansatz, bei dem zunächst die indirekten Bereiche das Produkt entwerfen, und die direkten Bereiche es im Anschluss produzieren, finden beim Simultaneous Engineering beide Prozesse parallel statt (vgl. [Send09, S. 11-12]). Dadurch sind zu Produktionsbeginn noch nicht alle Informationen zum Gesamtprodukt im Detail bekannt. Weiterhin führen kurzfristige Änderungswünsche des Kunden und Unschärfen bei der Produktentwicklung [Tu11, S. 18, S. 67] dazu, dass bereits vorhandene Fertigungsinformationen ihre Gültigkeit verlieren, sodass die indirekten Bereiche diese anpassen und die direkten Bereiche darüber in Kenntnis setzen müssen.

Verständlichkeit von Informationen

Während Serienfertiger eine hohe Prozessqualität durch kontinuierliche Verbesserung der Prozesse erreichen, ist dies aufgrund mangelnder Wiederholbarkeit in der Unikatproduktion nur begrenzt möglich. Heinig argumentiert, dass die indirekten Bereiche die Abläufe deswegen so genau wie möglich im Vorwege planen müssen [Hein15, S. 13]. Hierbei sind Zeit und Aufwand allerdings die begrenzenden Faktoren, sodass die Planung nicht den Detailgrad der Serienproduktion erreicht. Methoden wie bspw. das produktionsgerechte Konstruieren [REFA16, S. 116], die einen Mehraufwand in den indirekten Bereichen in Kauf nehmen, um die direkten Bereiche zu entlasten, sind nur in begrenztem Umfang lohnenswert. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass Unikatfertiger im Vergleich zur Serienproduktion nur begrenzt physische Prototypen erstellen, um Produkte oder Produktionsabläufe abzusichern [Tu11, S. 17]. Im Ergebnis stehen den Fertigungsmitarbeitern tendenziell abstraktere und detailärmere Informationen zur Verfügung als in der Serienproduktion. Mitarbeiter müssen daher kognitive Leistung zur Interpretation der Informationen investieren, während in der Serienfertigung bspw. auf Passung gefertigte, steckbare Teile die Arbeitsschritte Messen und Ausrichten verringern (vgl. [Feld14, S. 449ff.]). Dies geht einher mit einer meist hohen Produktkomplexität und Teilevielfalt, bspw. im Anlagen-, Schiff-, oder Flugzeugbau.

2.1.2 Produktaufbau und Informationskategorien

Typischerweise liegen den in Papierform bereitgestellten Fertigungsinformationen digitale Daten zugrunde, in denen der Produktaufbau festgehalten ist. Ein Produkt setzt sich aus Bauteilen zusammen, die, wie es bei komplexen Produkten der Regelfall ist, zu Baugruppen und Unterbaugruppen zusammengefasst sein können. Einen Überblick über die möglichen Bauweisen von Produkten geben Lotter und Wiendahl [Lott06, S. 27ff.]. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Aufbau eines Produkts, in diesem Fall eines Schiffs, aus Baugruppen, Unterbaugruppen und Bauteilen.

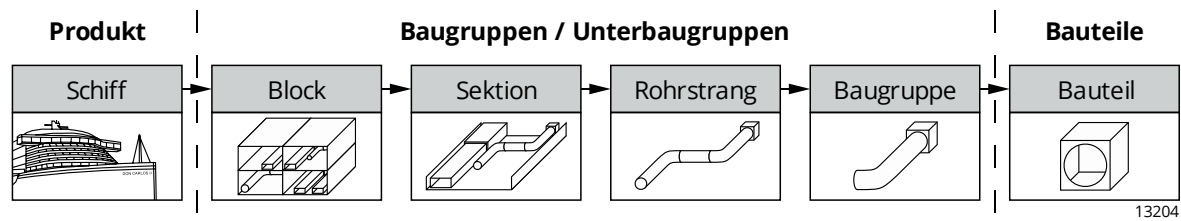


Abbildung 4: Exemplarischer Aufbau eines Produkts (Schiff)

Der Aufbau des Produkts spiegelt sich zum Teil in dessen Produktionsprozess wider, der mehrere Gewerke von der Fertigung der Einzelteile bis zur Endmontage durchläuft. Die Mitarbeiter benötigen dabei Informationen, die die Arbeitsvorbereitung erstellt, und denen Daten aus unterschiedlichen digitalen Quellen zugrunde liegen. Heinig teilt die Daten für virtuelle Technologien wie Augmented und Virtual Reality (VR) ein in Geometriedaten, die zur Produktgestalt zählen [Ponn11, S. 133ff.], sowie Planungsdaten und Untersuchungsdaten, wobei letztere für die Montageplanung in VR notwendig sind [Hein15, S. 20]. Für die Fertigung des Produkts sind dessen Gestalt und Planungsdaten relevant, deren Zusammensetzung in Abbildung 5 dargestellt ist. Die verwendeten Datenformate, die vorhandenen Daten und deren Detaillierungsgrad unterscheiden sich zum Teil erheblich zwischen Branchen, Unternehmen und Unternehmensbereichen.

Konstruktion	Arbeitsvorbereitung
Produktgestalt	Planungsdaten
• Geometriedaten • statische Metadaten	• Montageinformationen • dynamische Metadaten

13205

Abbildung 5: Datenquellen und die jeweils erzeugten Daten nach Heinig [Hein15, S. 20] und Ponn [Ponn11, S. 133ff.]

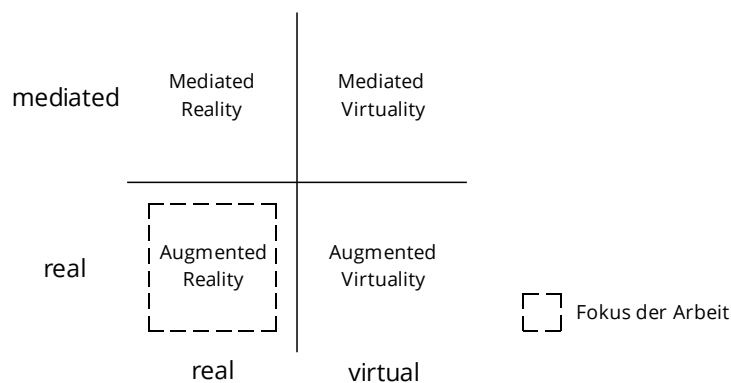
Die Konstruktionsabteilung legt die Produktgestalt fest, die üblicherweise hierarchisch in einer Produktstruktur gegliedert ist, dem Konstruktionsbaum. Die Geometriedaten sind dabei mit statischen Metadaten angereichert, die produktionsrelevante Eigenschaften der einzelnen Bauteile oder Baugruppen beschreiben – bspw. deren Gewicht, Schwerpunkt oder Material [Ponn11, S. 133ff.].

Die Arbeitsvorbereitung erstellt auf Basis der Produktgestalt die Fertigungsunterlagen für die Produktion. Hierbei erzeugen die Mitarbeiter weitere Daten: Montageinformationen, die das Montgevorgehen beschreiben, und dynamische Metadaten, die Reihenfolgen und Termine festlegen. Es entsteht neben dem Konstruktionsbaum eine zweite Struktur, die den Fertigungsablauf darstellt: der Fertigungsbaum. Dieser besteht aus Arbeitspaketen und Unterarbeitspaketen, die auszuführende Tätigkeiten enthalten (bspw. Montieren von Bauteilen). In der Praxis der Unikatifertigung erreicht der Fertigungsbaum oftmals nicht den Detailgrad des Konstruktionsbaums, sodass sich innerhalb der Arbeitspakete ein Interpretationsspielraum – bspw. in der Ausführungsreihenfolge – ergibt.

2.2 Augmented Reality

Augmented Reality (AR) bezeichnet das Anreichern der Realität mit virtuellen Elementen. Im Allgemeinen können solche virtuellen Elemente beliebige menschliche Sinne ansprechen. So ist die Erweiterung der Realität mit Geräuschen, Gerüchen oder virtuellen haptischen Elementen im Begriff Augmented Reality enthalten. Im gängigen Verständnis und in der vorliegenden Arbeit bezieht sich der Begriff Augmented Reality allerdings ausschließlich auf die Erweiterung der Realität mit visuellen Elementen.

Das von Milgram vorgestellte Reality-Virtuality-Kontinuum beschreibt den fließenden Übergang zwischen den zwei Extremen *reale* und *virtuelle* Umgebung [Milg95, S. 282]. Augmented Reality ordnet sich hier als eine Form der Mixed Reality ein. Ein allgemeineres Modell präsentiert Mann [Mann02, S. 1ff.]. Dieses erweitert das Reality-Virtuality-Kontinuum um eine zweite Dimension, die sogenannte Mediated Reality (dt.: *vermittelte Realität*), bei der die Realität in veränderter Form an den Betrachter gelangt. Abbildung 6 stellt das Mediated-Reality-Kontinuum dar und ordnet den Fokus dieser Arbeit darin ein.



13206

Abbildung 6: Mediated-Reality-Kontinuum

Eine Definition für Augmented-Reality-Anwendungen im engeren Sinne, die auch diese Arbeit verwendet, gibt Azuma [Azum97, S. 356]. Demnach hat eine Augmented-Reality-Anwendung drei Kriterien zu erfüllen: Sie muss Realität und virtuellen Inhalt kombinieren, in Echtzeit interaktiv und im Dreidimensionalen registriert sein.

Für eine solche Anwendung sind drei Komponenten notwendig: ein sogenanntes Tracking, das es ermöglicht, die virtuellen Elemente im Koordinatensystem der Realität auszurichten; eine Grafikeinheit, die eine AR-Szene berechnet, und ein Anzeigegerät, das dem Benutzer die Szene darstellt. Die Komponenten sind in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

2.2.1 Anzeigehardware

Für die Anzeige von Inhalten mit Augmented Reality eignen sich unterschiedliche Geräteklassen. Eine gängige Unterteilung nach der Positionierung des Anzeigegeräts treffen Bimber et al. [Bimb06, S. 2]. Demnach sind Anzeigegeräte entweder

- am Kopf befestigt (engl.: *Head-mounted Displays, HMDs*), wie bspw. AR-Brillen
- handgeführt, wie bspw. Tablet-Computer oder Smartphones, oder
- im Raum aufgestellt, wie bspw. Monitore oder Projektoren.

Eine weitere Unterscheidungsdimension findet sich bei van Krevelen et al. [vanK10, S. 3]: die Art der Vermischung von Realität und virtuellen Inhalten. Hier ergeben sich drei Möglichkeiten:

- Video-basierte Vermischung (engl.: *video see-through*):
Auf dem Anzeigegerät ist ein Videobild der Realität zu sehen, das mit virtuellen Inhalten überlagert ist.
- optische Vermischung (engl.: *optical see-through*):
Das Anzeigegerät überblendet die Realität über eine Spiegel- oder Linsenanordnung mit virtuellen Inhalten aus einer digitalen Quelle.
- Projektion (engl.: *projective*):
Ein Projektor nutzt die Realität direkt als Projektionsfläche für virtuelle Inhalte.

Abbildung 7 ordnet die Anzeigegeräte für Augmented Reality den beiden Dimensionen Position und Art der Vermischung zu.

	am Kopf befestigt	handgeführt	im Raum aufgestellt
videobasierte Vermischung	Virtual-Reality-Brillen	Tablet-Computer Smartphone	Monitor
optische Vermischung	Augmented-Reality-Brillen	–	Wasserdampf-Projektionsfläche
Projektion	am Kopf befestigter Projektor	Smartphone mit Miniaturprojektor	Laserprojektor

13207

Abbildung 7: Einteilung von AR-Geräten nach Position und Art der Vermischung

Bei vielen AR-Brillen mit optischer Vermischung deckt der Überblendungsbereich nur einen Teil des Sichtfeldes ab. Dies ist vor allem bei monokularen Brillen der Fall, die nur für ein Auge Informationen darstellen. In Anwendungsfällen, in denen die einzublendenden Elemente außerhalb dieses Bereichs liegen oder dessen Größe überschreiten, kommt daher häufig eine semitransparente, Video-basierte Vermischung in verkleinertem Maßstab zum Einsatz, obwohl das Gerät eine optische Vermischung unterstützt.

2.2.2 Visualisierung von Informationen mit AR

Grundsätzlich lässt sich mit AR eine Vielzahl von Inhalten darstellen. Punktmarkierungen, dreidimensionale Geometrien, semi-transparente Objekte, Richtungsinformationen, 3D-Animationen, Bilder, Schriftzüge und Videos finden sich in vielen AR-Anwendungen. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über bestehende Ansätze, AR-Inhalte zu klassifizieren. Das Konzept greift diese wieder auf, um zu entscheiden, auf welche Weise Informationen als AR-Inhalte darzustellen sind. Eine Definition für sogenannte Annotationen liefern Wither et al. [With09, S. 2]:

„Eine AR-Annotation ist eine virtuelle Information, die auf eine bestimmte Weise ein bestehendes Objekt beschreibt und an ihm registriert ist.“

Den AR-Inhalt beschreiben sechs Merkmale:

- **geometrische Komplexität ihres Bezugsorts:**
Inhalte können auf Punkte oder Objekte mit komplexerer Geometrie verweisen.
- **Variabilität der Position:**
Die Einblendung einer Soll-Geometrie ist z. B. in ihrer Position in sechs Freiheitsgraden festgelegt, während die Beschriftung zu einem Objekt in ihrer Position variabel sein kann.
- **semantische Relevanz:**
Der Inhalt kann Informationen über das reale Objekt liefern (hohe semantische Relevanz, bspw. Name, Material oder Maße) oder Informationen hinzufügen, die für das reale Objekt keinerlei Relevanz haben (z. B. virtuelle Figuren, die sich auf dem Objekt befinden).
- **Komplexität:**
Die Komplexität des Inhalts reicht von einem einfachen Punkt bis hin zu realitätsnahen animierten Objekten, wobei ein Inhalt in seiner Gestalt oder seinem zeitlichen Verhalten komplex sein kann. Je höher die Komplexität des Inhalts, desto höher ist auch sein potenzieller Informationsgehalt [With09, S. 4].
- **Interaktivität:**
Der Grad, in dem der Benutzer mit den Objekten interagieren kann (oder muss), variiert je nach Anwendung. Inhalte können rein statischer Natur sein, auf Nutzereingaben reagieren, veränderbar oder sogar erstellbar sein.
- **Lebensdauer:**
Die Lebensdauer eines Inhalts, die Zeitspanne also, während der er sichtbar ist, hängt von unterschiedlichen Parametern wie der Zeit, Benutzereingaben, der Position oder anwendungsspezifischen Informationsfiltern ab.

Eine Analyse bestehender AR-Anwendungen zeigt, dass sich die Inhalte je nach Einsatzgebiet deutlich unterscheiden. Während industrielle Anwendungen vor allem Inhalte mit ho-

her semantischer Relevanz an einer festen Position anzeigen (eine spezifische Zusatzinformation zu einem Objekt), liegt der Fokus von Unterhaltungsanwendungen auf der positionsvariablen Anzeige semantisch weniger relevanter Informationen (eine generelle Veränderung der realen Umgebung ohne konkreten Objekt-Informationsbezug) [With09, S. 5].

Für den Konzeptteil der vorliegenden Arbeit sind vor allem die Merkmale Komplexität, Interaktivität und Lebensdauer von Belang, denn sie bestimmen einerseits, wie viel Informationsgehalt der Inhalt vermittelt und wie aufwändig seine Erstellung ist, andererseits, wie produktiv die Bedienung der entworfenen AR-Anwendung ist. Die semantische Relevanz der Inhalte ist darüber hinaus ein geeignetes Kriterium, um zu beurteilen, ob sich die in der Anwendung dargestellten Informationen tatsächlich zum besseren Verständnis des Arbeitsinhalts eignen.

Eine weitere Taxonomie für AR-Inhalte stellen Tönnies et al. vor und unterscheiden in den folgenden fünf Merkmalen [Tönn13, S. 997]:

- Zeitverhalten:
Inhalte sind entweder kontinuierlich sichtbar oder nur zeitweise.
- Dimension:
Inhalte sind entweder zwei- oder dreidimensional.
- Betrachtungsbezug:
Der Blick auf ein Objekt erfolgt entweder aus dem Betrachtungspunkt des Benutzers (egozentrisch), aus einem geometrisch mit dem Nutzer verbundenen Betrachtungspunkt (eigenbewegt) oder von einem externen Beobachtungspunkt (exozentrisch).
- Anker und Registrierung:
Der Inhalt ist an einem realen Objekt (Anker) registriert und folgt dessen Bewegung. Anker können der Körper eines Nutzers (z. B. dessen Hand), die Umgebung oder ein globales Koordinatensystem sein.
- Referenzart:
Inhalte können durch eine direkte Überblendung vorhandene Objekte darstellen (Ist-Zustand), verdeckte Objekte sichtbar machen („Röntgenblick“) oder auf nicht vorhandene Objekte hinweisen (Soll-Zustand).

Bis auf das Merkmal Zeitverhalten erweitern diese die zuvor aufgeführte Definition. Der Aspekt der Referenzart zeigt zudem auf, auf welche Arten sich Informationen mit AR visualisieren lassen.

Occlusion-Geometrien

Bei der Visualisierung von Informationen mit AR können Probleme auftreten, die die Darstellung unrealistisch wirken lassen – einen Überblick geben Kruijff et al. [Krui10, S. 3ff.]. Um die dreidimensionale Lage komplexer geometrischer Objekte verständlich vermitteln zu können, ist besonders die korrekte Darstellung der Tiefeninformationen relevant.

Die bisher getroffenen Definitionen und Taxonomien gehen von einer Überblendung der Realität mit virtuellen Informationen aus. Allerdings befinden sich einzublendende Geometrien nicht immer vollständig *vor* den realen Objekten, sondern liegen zum Teil *hinter* ihnen. Eine einfache Überblendung führt in diesem Fall zu einer inkorrekten Darstellung und macht den geometrischen Zusammenhang der Objekte unverständlich.

Die Software, die die Szene berechnet, muss für eine korrekte Darstellung die Tiefenrelationen *vor* und *hinter* zwischen realen und virtuellen Objekten aus der Betrachtungsperspektive kennen. Diese lassen sich mit den typischerweise in den Geräten verwendeten 2D-Kameras nicht erfassen. Ein Behelf sind sogenannte Occlusion-Geometrien (dt.: *Verdeckungsgeometrien*): Sofern ein 3D-Modell der aktuellen Umgebung vorliegt, lässt sich aus diesem bestimmen, welche Teile der Umgebung *vor* den virtuellen Objekten liegen. Verdeckt eine solche Occlusion-Geometrie ein einzublendendes Objekt, überblendet die Grafikeinheit die Realität im entsprechenden Bildbereich nicht, sodass der Eindruck entsteht, das virtuelle Objekt verschwinde hinter dem realen.

Abbildung 8 zeigt die Auswirkungen von Occlusion-Geometrien auf die Darstellung. Das einzubauende Rohr (blau) verläuft durch den Ausschnitt im Spantenrahmen eines Schiffs. Der korrekte geometrische Zusammenhang lässt sich allerdings erst bei Verwendung von Occlusion-Geometrien erkennen.



13208

Abbildung 8: Einblendung eines Rohres ohne (links) und mit Occlusion-Geometrien (rechts)

2.2.3 Tracking

Das dritte von Azuma beschriebene Merkmal von AR ist die Registrierung im Dreidimensionalen. Um diese zu erreichen, müssen beide Koordinatensysteme – das reale und das der virtuellen Inhalte – aufeinander ausgerichtet sein. Dies geschieht über ein sogenanntes Tracking. Der Begriff des Trackings beschreibt im Allgemeinen die Verfolgung der Bewegung eines Objekts. Dies schließt Anwendungsfälle ein wie bspw.:

- Warenttracking, das Bestimmen der momentanen Position einer Ware bei logistischen Vorgängen wie etwa dem Paketversand,
- Personentracking, das Erfassen der Position oder Haltung einer oder mehrerer Personen aus Sensordaten, oder
- Objekttracking, das Ermitteln der Position und der Orientierung eines Objekts, zusammen Pose.

Die Registrierung der beiden Koordinatensysteme für AR erfordert ein Objekttracking, wobei die Pose des verwendeten Anzeigegeäts zu ermitteln ist. Hierzu existiert eine Vielzahl von Verfahren, die sich in Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Anzahl der erfassten Freiheitsgrade, Kosten und ihrem Kalibrierungsaufwand unterscheiden. Zudem gibt es absolute Verfahren, die die Pose M_n zu jedem Zeitpunkt n vollständig bestimmen, und inkrementelle Verfahren, die für jeden Zeitpunkt m nur die Veränderung der Pose M_{nm} seit dem letzten Abfragezeitpunkt n angeben (Abbildung 9). Absolute Verfahren haben fast immer eine beschränkte Reichweite; inkrementelle Verfahren haben den Nachteil, dass sich kleine Fehler aus jedem Einzelschritt nach einiger Zeit zu einem großen Fehler summieren können.

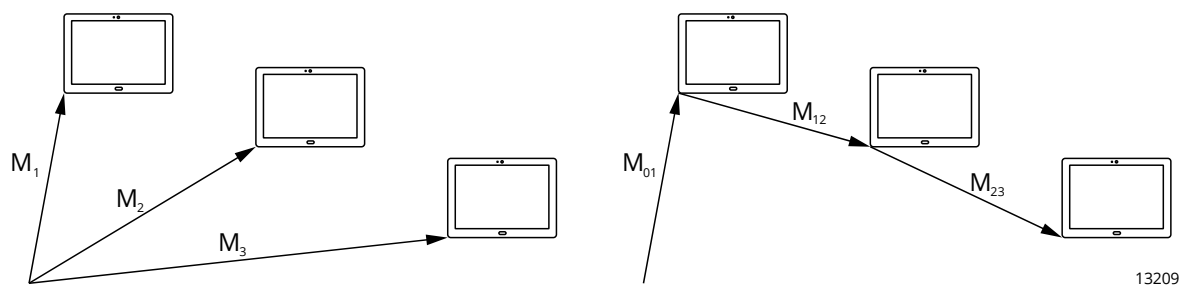


Abbildung 9: Funktionsprinzipien von absolutem (links) und inkrementellem Tracking (rechts)

Ein weiteres Unterscheidungskriterium für Trackingverfahren ist die Positionierung der Ortungssensoren: Beim Outside-In-Tracking (dt.: *Fremdortung*) sind die Sensoren an bekannten Punkten in der Umgebung befestigt und ermitteln die Pose eines beweglichen Objekts; beim Inside-Out-Tracking (dt.: *Eigenortung*) befinden sich die Sensoren am beweglichen Objekt selbst und ermitteln die Pose der Umgebung relativ zum Objekt [Hiro10, S. 5].

Abbildung 10 stellt die Funktionsweisen beider Verfahren gegenüber. Bei einer Fremdortung (im Bild links) ist M_S die bekannte Pose des Sensors: Dieser ermittelt die Relativpose M_{SR} einer Referenz. Diese ist mit der bekannten Relativpose M_{OR} am Objekt befestigt. Im Gegensatz dazu ist bei einer Eigenortung (im Bild rechts) M_R die bekannte Pose einer Referenz in der Umgebung: Der mit der bekannten Relativpose M_{OS} am Objekt befestigte Sensor erkennt diese in der Relativpose M_{RS} . Die absolute Objektpose M_O in der realen Umgebung ergibt sich jeweils aus den Differenzen.

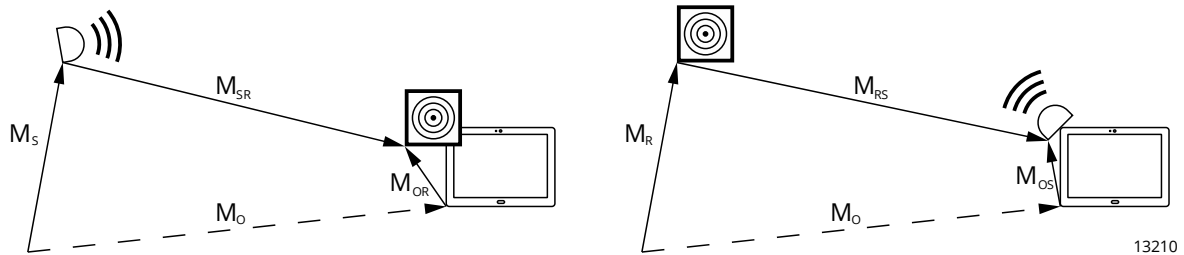


Abbildung 10: Funktionsprinzipien von Outside-In- (links) und Inside-Out-Tracking (rechts)

Alle Trackingverfahren verwenden eine Referenz, die der Sensor erkennt und aus der er die Pose des Objekts berechnet. Referenzen sind unter den Bezeichnungen Marker, Markierungen, Features (dt.: *Merkmale*) oder Tags (dt.: *Etiketten, Anhänger*) bekannt. Sie lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

- natürliche Referenzen, die bereits in der Umgebung oder am zu trackenden Objekt vorhanden sind [Wagn08, S. 127ff.], wie etwa markante Punkte, Kanten sowie die Gravitationskraft oder das Erdmagnetfeld, und
- künstliche Referenzen, die sich an bekannten Positionen befinden und speziell dem Tracking dienen – bspw. optische Marker [Reki98, S. 63ff.] oder Funk-Sender.

Natürliche Referenzen haben vor allem bei wechselnden Umgebungen oder Objekten den Vorteil, dass kein Material- oder Arbeitsaufwand für das Einbringen der Referenzen in die Umgebung erforderlich ist. Wenn die Positionen der natürlichen Referenzen bereits bekannt sind, entfällt auch das Ausmessen. Künstliche Referenzen lassen sich in der Regel einfacher oder genauer erkennen.

Einen Überblick über Trackingverfahren geben Welch et al. [Welc02, S. 24ff.]. Im Folgenden sind die am weitesten verbreiteten Verfahren mit ihren wichtigsten Eigenschaften dargestellt. Es zeigt sich, dass jedes Verfahren charakteristische Defizite aufweist, sodass kein einzelnes Verfahren als optimal gelten kann.

Optisches Tracking

Bei optischen Trackingverfahren kommt eine Kamera als Sensor zum Einsatz. Bildverarbeitungsalgorithmen ermitteln aus den Sensordaten die Pose der Referenzen. Es lassen sich – abhängig von den gewählten Referenzen und ihrer Anzahl – alle sechs Freiheitsgrade bestimmen. Optisches Tracking funktioniert sowohl als Outside-In- (Kameras in der Umgebung) als auch als Inside-Out-Variante (Kamera am AR-Gerät).

Als künstliche Referenzen kommen grafische Marker zum Einsatz, die ein absolutes Tracking ermöglichen. Die Genauigkeit hängt maßgeblich von der Kameraauflösung, der Kalibrierengenauigkeit, der Entfernung zum Marker sowie von dessen Größe ab. Auch natürliche Referenzen sind erkennbar: Kanten lassen sich für absolutes Tracking verwenden,

Features – markante, kontrastreiche Punkte – finden bei inkrementellem Tracking Anwendung. Hierbei hängt die Genauigkeit zusätzlich von der Anzahl und Güte der gefundenen Merkmale ab.

Bei speziellen optischen Trackingverfahren kommen Infrarotkameras zum Einsatz, die sogenannte Targets – Konstellationen reflektierender Kugeln – erkennen. Sie bieten eine sehr hohe Genauigkeit, erfordern aber einen erhöhten Kalibrieraufwand. Zudem ist die Reichweite der Kameras beschränkt. Eine weitere Möglichkeit bieten 3D-Kameras, die als natürliche Merkmale die dreidimensionale Struktur der Umgebung verwenden [Izad11, S. 559ff.].

Tracking über Inertialsensoren

Inertialsensoren sind Beschleunigungssensoren, die Beschleunigungen entlang der drei Koordinatenachsen messen, oder gyroskopische Sensoren, die die Winkelgeschwindigkeit der Drehungen um die drei Koordinatenachsen messen. Zusammen ergeben sich alle sechs Freiheitsgrade: Die Position bzw. die Rotation lässt sich durch Integration der Messwerte berechnen. Es handelt sich um ein inkrementelles Trackingverfahren, das bereits bei kürzeren Distanzen erhebliche additive Abweichungen aufweist. Für den Drehwinkel um die horizontalen Koordinatenachsen lassen sich auch Beschleunigungssensoren verwenden, die aufgrund der Gravitation einen absoluten Wert liefern. Für den Drehwinkel um die Höhenachse kann ein Kompass mit absoluten Werten unterstützen; dieser unterliegt allerdings Störeinflüssen aus der Umgebung. Üblicherweise finden Trackingverfahren über Inertialsensoren Einsatz, um andere Trackingverfahren zu unterstützen.

Funk- und Schallortung

Die Ortung von Objekten über Funk oder Schall erfolgt entweder über eine Messung der Signallaufzeit oder der Signalstärke. Bei der Outside-In-Variante senden Referenzen in der Umgebung Signale aus, die der Empfänger am Objekt auswertet, um die jeweilige Entfernung zu berechnen. Für das Inside-Out-Tracking empfangen Referenzen in der Umgebung die Signale des Senders am Objekt. Multilaterationsverfahren schätzen aus den gegebenen Positionen der Referenzen und den jeweils gemessenen Entfernungen die absolute Position des Objekts. Dessen Orientierung lässt sich mit diesem Verfahren nur mit mehreren Empfängern bzw. Sendern am Objekt bestimmen. Zudem ist die Entfernungsmessung ohne direkte Sichtlinie fehleranfällig. Weitere Verfahren messen den Winkel, unter dem die Signale beim Empfänger eintreffen, und berechnen die Position über Multiangulation.

Kinetisches Tracking

Kinetisches Tracking funktioniert über eine mechanische Verbindung zwischen Umgebung und Objekt. Für absolute Verfahren stellt ein beweglicher Messarm diese Verbindung her, dessen Gelenkwinkel Inkrementalsensoren bestimmen. Die Pose der Messspitze und damit

des Objekts ergibt sich aus den Gelenkwinkeln. Bei inkrementellen Verfahren messen Odometriesensoren von einem Startpunkt aus die zurückgelegte Strecke auf einem Untergrund sowie die Bewegungsrichtung. Aus der Integration der Messwerte über die Zeit ergibt sich die momentane Pose des Objekts.

Abbildung 11 zeigt einen Überblick über übliche Trackingverfahren und deren Vor- und Nachteile. Es zeigt sich, dass kein Trackingverfahren anderen grundsätzlich überlegen ist, sondern je nach Anwendungszweck unterschiedliche Trackingverfahren zum Einsatz kommen müssen.

Tracking-verfahren	Posenbestimmung	Ortungsart	Referenzart	Freiheitsgrade	Genauigkeit	Kalibrierung	Portabilität	Reichweite
Optisch								
Marker	absolut	F/E	künstlich	3T, 3R	+	-	+	-
Kanten	absolut	E	natürlich	3T, 3R	+	+	+	-
2D-Features	inkrementell	E	natürlich	3T, 3R	o	+	+	o
3D-Features	beide	E	natürlich	3T, 3R	+	+	o	+
Infrarotmarker	absolut	F	künstlich	3T, 3R	++	-	-	o
Inertial								
Gyrosensoren	inkrementell	E	natürlich	3R	-	+	+	o
Beschl.-sensoren	inkrementell	E	natürlich	3T	-	+	+	o
Funk-/Schallbasiert								
Ultraschalllaufzeit	absolut	F/E	künstlich	3T	o	-	+	+
Funklaufzeit	absolut	F/E	künstlich	3T	o	-	+	+
Funksignalstärke	absolut	F/E	künstlich	3T	-	-	+	+
Funkangulation	absolut	F/E	künstlich	3T, 3R	o	-	+	+
RFID	absolut	F/E	künstlich	3T	-	-	+	+
Kinetisch								
Messarme	absolut	-	natürlich	3T, 3R	++	+	-	-
Odometrie	inkrementell	-	natürlich	2T, 1R	+	+	o	+

F = Fremddortung, E = Eigenortung
T = Translation, R = Rotation
++ = sehr gut, -- = sehr schlecht

13211

Abbildung 11: Überblick über die Vor- und Nachteile bestehender Trackingverfahren

2.2.4 Augmented Reality in der Industrie

Während sich viele AR-Anwendungen auf den Endverbraucher-Markt konzentrieren und dort zumeist als Entertainment- oder Planungslösung dienen, haben auch Industrie und Forschung zahlreiche Anwendungen und Prototypen hervorgebracht. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick und eine Kategorisierung der Anwendungsfälle.

AR lässt sich in nahezu allen Phasen eines Produktlebenszyklus einsetzen: von der Planung und Präsentation beim Kunden über Aufgaben in der Produktion bis hin zu unterstützen den Tätigkeiten wie dem Training von Mitarbeitern oder der Wartung des Produkts oder

der Produktionsanlagen. Abbildung 12 zeigt eine exemplarische Auswahl bestehender Prototypen und Produkte und ordnet die Anwendungsfälle ein: Die horizontale Achse beschreibt die Komplexität der Informationen, die die AR-Anwendung darstellt, die vertikale Achse den Unikatcharakter des Beispiels hinsichtlich der Flexibilität und der Wiederholhäufigkeit der Tätigkeit. Die Anwendungsfälle sind im Folgenden diskutiert.

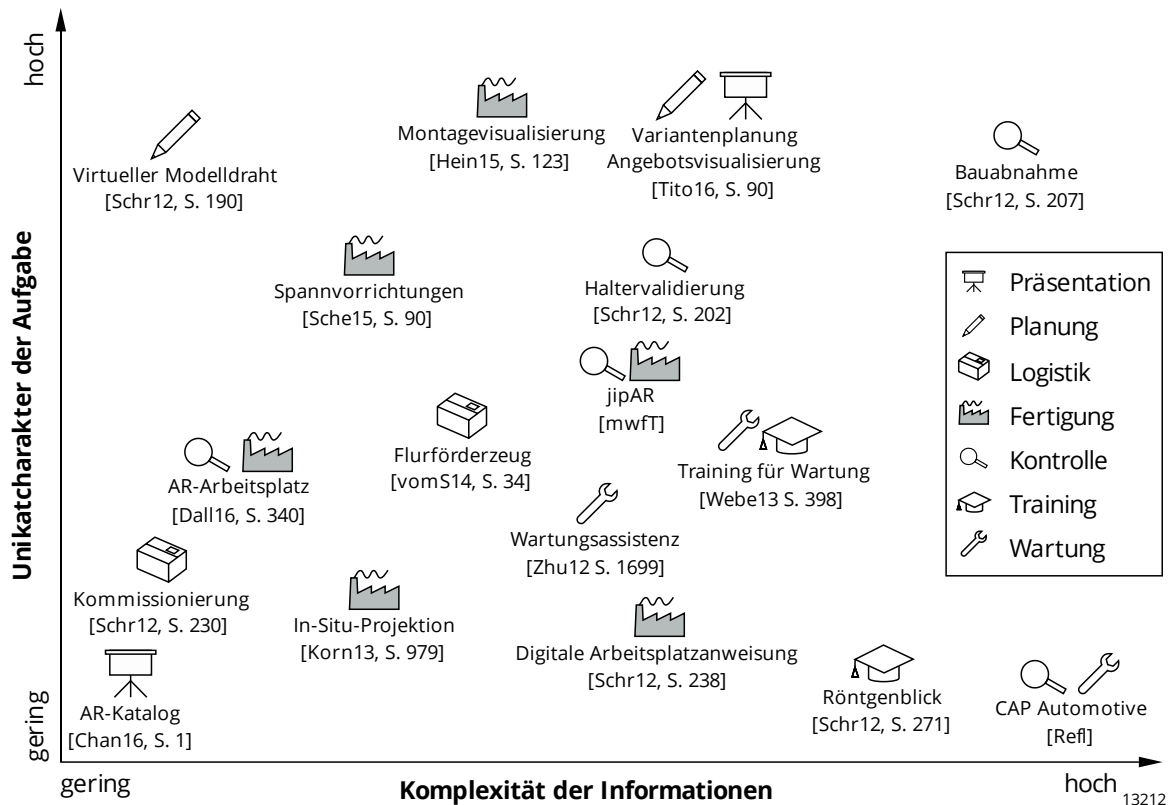


Abbildung 12: Überblick über eine Auswahl bestehender industrieller AR-Anwendungen

Präsentation

Chandra et al. entwickeln einen AR-Online-Katalog, der es potenziellen Kunden ermöglicht, Produkte interaktiv zu betrachten, in die eigene Nutzungsumgebung einzublenden und bestimmte Eigenschaften wie etwa die Farbe zu konfigurieren [Chan16, S. 1ff.].

Planung

Für die Vor-Ort-Planung von Rohrgeometrien entwickelten die Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW) und das Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) die Anwendung *Virtueller Modelldraht* [Schr12, S. 190ff.]. Sie ermöglicht es Fertigungsmitarbeitern, in einer AR-Ansicht Rohre zu parametrisieren, um diese in eine vorliegende Bausituation einzupassen. Die Bestellung der Rohre kann direkt aus der Anwendung heraus erfolgen. Die Anwendung weist einen hohen Grad an Spezialisierung auf.

Titov stellt einen Prototyp zur Planung von Varianten im Umbau großer Investitionsgüter wie bspw. Schiffen vor, der die Kommunikation zwischen Kunden und Auftragnehmern während der Planungsphase vereinfacht [Tito16, S. 90ff.]. Die einzubauenden Großkomponenten lassen sich dabei mit AR direkt am Objekt darstellen und in ihrer Position und Ausrichtung verändern. Gespeicherte Konfigurationen dienen im Anschluss der Präsentation bei Entscheidungsträgern und zur Planung des Montageprozesses in VR.

Logistik

Zahlreiche unter der Bezeichnung Pick-by-Vision bekannte Anwendungen, wie bspw. bei Schreiber [Schr12, S. 230ff.], unterstützen manuelle Kommissioniertätigkeiten, indem sie dem Mitarbeiter über eine AR-Brille Informationen in das Sichtfeld einblenden. Hierzu zählen Produktnamen, Fachnummern, Anzahlen oder Richtungsanweisungen.

Zur Unterstützung der Bedienung von Flurförderzeugen entwickeln vom Stein et al. ein Head-up Display (HUD), das Informationen zu Aufträgen sowie dem Fahrzeugzustand, insbesondere der Position der Gabel zum Aufnehmen der Last, im Sichtfeld des Fahrers darstellt [vomS14, S. 34ff.].

Obwohl bei beiden Anwendungen eine Einblendung erfolgt, zählen diese nach der Definition von Azuma strenggenommen nicht zur AR, da die angezeigten Objekte nicht im Dreidimensionalen, sondern nur am Anzeigegerät registriert sind.

Fertigung und Montage

Korn et al. entwickeln einen Prototyp, der eine Fertigungsabfolge auf einen stationären Arbeitsplatz projiziert [Korn13, S. 980ff.]. Ziel hierbei ist es, vor allem Menschen mit Behinderungen bei der Ausführung von Montagetätigkeiten zu unterstützen.

Ein Editor für sogenannte digitale Arbeitsplatzanweisungen dient bei Schreiber dazu, Arbeitsinformationen aufwandsarm für die Darstellung am Arbeitsplatz in 3D und mit AR aufzubereiten [Schr12, S. 238ff.]. Hierzu lassen sich Arbeitsabläufe und Arbeitsschritte definieren.

Das Rüsten von Spannvorrichtungen für die Herstellung von Spezialmaschinen unterstützt eine bei Schenk vorgestellte Anwendung [Sche15, S. 90]. Sie blendet schrittweise die Soll-Position und Ausrichtung der in der Spannvorrichtung zu montierenden Teile ein.

Eine weitere Anwendung für stationäre Arbeitsplätze beschreiben Dalle Mura et al.: Sie blendet dem Mitarbeiter schrittweise die auszuführenden Montagetätigkeiten ein [Dall16, S. 340]. Gleichzeitig überprüft das System auf Basis des Kamerabildes und der Daten aus Kraftsensoren unter dem zu montierenden Werkstück, ob der Mitarbeiter die Aufgabe korrekt ausgeführt hat, und blendet im Fehlerfall Korrekturhinweise mit AR ein.

Die Firma mwf-technology vertreibt die Anwendung jipAR, mit der sich Marker-basiert oder per manueller Ausrichtung Inhalte in das Kamerabild eines Tablet-Computers einblenden lassen [mwft16]. Die Anwendung ist sowohl auf die Einblendung für die Montage als auch auf einen Soll-Ist-Abgleich zur Qualitätssicherung ausgelegt und orientiert sich am Strukturbaum des CAD-Modells.

Ein von Heinig entwickelter Prototyp zeigt einen in VR erstellten Montageplan in AR an und verdeutlicht Einbaupfade mit animierten Geometrien [Hein15, S. 123ff.]. Die Anwendung ist speziell auf die Unikatproduktion ausgelegt, erfordert jedoch eine feingranulare Planung der Montageschritte auf Bauteilebene.

Qualitätssicherung

Zur Beschleunigung der Kontrolle von Halterungen im Flugzeugrumpf entwickelte Airbus einen AR-gestützten Soll-Ist-Abgleich [Schr12, S. 202]. Die Anwendung blendet die Konstruktionsdaten aus dem Digital-Mock-Up (DMU) in ein Kamerabild des realen Flugzeugrumpfes ein.

Die Überprüfung, deren Dokumentation und die Abnahme großer Produktionsanlagen ermöglicht ein bei Daimler entwickeltes System zum Soll-Ist-Abgleich [Schr12, S. 207]. Das System lässt sich auf einem mobilen Wagen durch die Anlage bewegen und blendet auf einem Monitor den Soll-Zustand aus den DMU-Daten in das Kamerabild der Produktionsanlage geometrisch korrekt ein.

Wartung

Für die Wartung von Personenkraftwagen stellt die Firma RE'FLEKT in Kooperation mit Bosch, Jaguar und Land Rover AR-gestützte Anleitungen auf Tablet-Computern bereit, die den Nutzern schrittweise Aus- und Einbauanweisungen darstellt, bspw. zum Tausch eines Zündkabelsatzes [Refl15].

Zhu et al. stellen ein System zur Unterstützung von Wartungsarbeiten vor, das Nutzern mit textbasierten Einblendungen und Markierungen die jeweils auszuführenden Arbeitsschritte verdeutlicht [Zhu12, S. 1699]. Das zugrundeliegende Format für Arbeitsschritte berücksichtigt dabei unterschiedliche Wissensstände der Nutzer, sodass sich der Detailgrad der Informationen anpassen lässt.

Schulung

Ein sogenannter Röntgenblick durch die Karosserie von Personenkraftwagen soll bei Volkswagen die Schulung erleichtern [Schr12, S. 271]. Ein AR-System macht verdeckte Bauteile sichtbar, indem es diese auf die Karosserie des Fahrzeugs projiziert. Hierdurch lassen sich Aufwände für die Demontage und Präparation von Schulungsfahrzeugen vermeiden.

Eine AR-Anwendung für das Training von Wartungsvorgängen beschreiben Webel et al. [Webe13, S. 398ff.]. Diese soll Schulungsvideos ersetzen, indem sie die zu erlernenden Schritte reihenfolgegerecht auf einem Tablet-Computer in das Kamerabild einblendet. Nutzer können den Detailgrad der Informationen bestimmen, der für ihren Wissensstand geeignet ist.

2.2.5 Defizite, Anwendungsfälle und Potenziale

Der Einsatz von AR-Lösungen ist zwar in einer Vielzahl von Szenarien denkbar, birgt jedoch nicht immer einen Nutzen. Schilling [Schi07, S. I] nennt zusätzlich zur generellen Rentabilität der Lösung folgende Bedingungen, unter denen der Einsatz von AR sinnvoll ist:

- komplexe Vorgänge und Zusammenhänge
- hohe Bauteilanzahl, Positions- und/oder Variantenvielfalt

Nach Schenk [Sche15, S. 90] müssen die folgenden Kriterien für den Einsatz von AR in der Fertigung erfüllt sein:

- manuelle Montagetätigkeiten mit hoher Komplexität
- geringe Losgrößen und hohe Variantenvielfalt
- Montageprozesse mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen
- Vorhandensein von 3D-Konstruktionsdaten

Hinsichtlich der benötigten Komplexität der manuellen Tätigkeiten und der damit einhergehenden Komplexität der benötigten Informationen stimmen beide Definitionen überein. Ebenfalls ist das zweite Kriterium beiden Definitionen gemeinsam: hohe Bauteilanzahlen, Positions- und Variantenvielfalt sowie geringe Losgrößen führen zu einer geringeren Wiederholrate einzelner Arbeitsschritte. Jeske et al. argumentieren darüber hinaus, dass AR-Lösungen oder die interaktive Anzeige von Arbeitsinhalten nur bei Tätigkeiten mit geringer Wiederholhäufigkeit der herkömmlichen Repräsentation wie einer Textform überlegen sind [Jesk14, S. 188]. Andernfalls förderten herkömmliche Unterlagen die Bildung eines mentalen Modells der Aufgabe und führten letztlich zu einer geringeren Ausführungsdauer. Die ersten beiden Kriterien entsprechen damit der horizontalen bzw. vertikalen Achse des Diagramms in Abbildung 12. Besonders sinnvolle Anwendungsfälle müssten sich demnach im oberen rechten Bereich befinden. Anwendungen in der Fertigung und Montage befinden sich jedoch fast ausschließlich in der unteren und linken Hälfte des Diagramms. Wenngleich diese für ihren Einsatzzweck nutzbringend sein können, verfehlen sie den potenzialträchtigsten Anwendungsfall und bleiben Insellösungen. Eine Anwendung, die es vermag, komplexe Informationen für Unikate oder unikatähnliche Produkte darzustellen, fehlt. Eine Untersuchung von 120 Artikeln zum Einsatz von AR in der Industrie zeigte zudem, dass es vor allem an Evaluationen in realen industriellen Szenarien mangelt [Wang13, S. 10]. Die Autoren kritisieren die spärliche Betrachtung der Effektivität und

Benutzerfreundlichkeit der entwickelten AR-Anwendungen in der Praxis und beanstanden weiterhin, dass zu wenig Bemühung in die Entwicklung praxisgerechter Anwendungen unter Zuhilfenahme von Fachwissen geflossen ist. Hieraus ergibt sich unmittelbar die Notwendigkeit der vorliegenden Arbeit. Diese hat zum Ziel:

- Die Analyse des Informationsprozesses in der Unikatfertigung unter Zuhilfenahme von Fachwissen.
- Die Entwicklung einer Anwendung, die geeignet ist, auch für die komplexen Prozesse in der Unikatfertigung Informationen bereitzustellen.
- Die Ausrichtung der Anwendung auf eine hohe Effektivität und Benutzerfreundlichkeit in der betrieblichen Praxis.
- Die Bewertung des Nutzens der Anwendung in praxisnahen Szenarien.

2.3 Prozessinnovationen

Das in der vorliegenden Arbeit dargestellte Konzept zielt auf die Vereinfachung von Informationstätigkeiten im Produktionsprozess. Es handelt sich damit um eine Prozessinnovation [Diss12, S. 24]. Als wesentliche direkt messbare Faktoren für den Erfolg von Prozessinnovationen gelten die Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeit [Krüg06, S. 117]. Das bedeutet, dass Prozessinnovationen dazu dienen, die Gesamtkosten eines Prozesses zu senken und die Effizienz zu steigern, die Beschaffenheit der Prozessleistung zu verbessern bzw. die Durchlaufzeit zu reduzieren [Scha14, S. 21]. Für die Entwicklung des Konzepts sowie zur späteren Evaluation greift die vorliegende Arbeit auf die folgenden Zielgrößen und Messverfahren zurück.

2.3.1 Kosten und Produktivität

Die Rentabilität eines Unternehmens gilt als wesentliches ökonomisches Ziel zur Sicherung seiner langfristigen Existenz. Wesentliche Einflussgrößen auf die Rentabilität eines Unternehmens sind die ausgebrachte Menge an Gütern sowie die Kosten für deren Herstellung [Diss12, S. 31]. Setzt man beide Einflussgrößen zueinander in Relation, ergibt sich die Produktivität eines Systems. Sie gibt das Verhältnis zwischen dem Output an produzierten Gütern und dem Input der dafür eingesetzten Ressourcen an [Bokr06, S. 41] und ist definiert als:

$$P = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \quad (1)$$

P	Produktivität
Output	produzierte Leistungseinheiten
Input	eingesetzte Ressourcen

Hierbei ist der Output typischerweise entweder als Anzahl der produzierten Güter oder in produzierten Vorgabestunden angegeben. Der Input bestimmt die Art der gemessenen Teilproduktivität [Webe98, S. 88]. Man unterscheidet hierbei zwischen:

- Personalproduktivität (in bezahlten Arbeitsstunden),
- Maschinenproduktivität (in Betriebsstunden) und
- Materialproduktivität.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Verbesserung der Informationsversorgung für Mitarbeiter direkter Bereiche bei manuellen Tätigkeiten. Entsprechend ist die relevante Messgröße die Personalproduktivität. Der Vergleich zwischen der Personalproduktivität des herkömmlichen und des innovierten Prozesses erlaubt es, den ökonomischen Erfolg einer Prozessinnovation zu beurteilen. Unter Einsetzen der relevanten Input- und Output-Größen in Gleichung (1) ergeben sich für die Personalproduktivität P_p folgende Gleichungen:

$$P_{p1} = \frac{\text{Anzahl produzierter Güter}}{\text{bezahlte Mitarbeiterstunden}} \quad (2)$$

$$P_{p2} = \frac{\text{produzierte Vorgabestunden}}{\text{bezahlte Mitarbeiterstunden}} \quad (3)$$

Die Berechnung der Personalproduktivität nach Gleichung (2) über die Anzahl produzierter Güter eignet sich vor allem bei konstantem Arbeitsinhalt pro Stück. Vorgabestunden gewichteten Tätigkeiten nach ihrem Umfang. Dieser variiert in der Unikatproduktion, da sich die produzierten Güter per Definition nicht gleichen. Für die Unikatproduktion ist entsprechend Gleichung (3) zu verwenden.

2.3.2 Messung von Personalproduktivität

Zur Messung der Personalproduktivität besteht eine Vielzahl von Verfahren, deren Fokus und Detailgrad sich je nach Fertigungsart und Zielsetzung der Produktivitätsanalyse unterscheiden [Czum13, S. 15ff.]. Verbreitete Methoden wie die REFA-Zeitaufnahme oder die Verfahren des Methods-Time Measurement (MTM) eignen sich vor allem für solche Tätigkeiten, die sich häufig wiederholen. Sie kommen somit für den Einsatz in der Unikatfertigung nicht in Frage [Tiet17, S. 19], da prinzipbedingt nur eine sehr geringe Wiederholrate gleicher Arbeitsschritte vorliegt, sodass konkrete, arbeitsschrittbezogene Verbesserungsmaßnahmen nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtproduktivität haben. Die Menge verschiedener Arbeitsabläufe würde zudem zu einem erheblichen Erfassungsaufwand führen [Tiet13, S. 187].

Für die vergleichende Produktivitätsmessung zur Validierung des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Konzepts sind vor allem zwei Kennzahlen relevant: die Gesamtmontagezeit sowie der Anteil der Informationstätigkeiten. Czumanski stellt die unterschiedlichen Verfahren zur Produktivitätsmessung gegenüber und beschreibt die jeweils erfassten Kennzahlen [Czum13, S. 19]. Hiernach eignet sich eine Kombination aus Zeitaufnahme

und Multimomenthäufigkeitsverfahren (MMH) [VDI2492] [Bokr06, S. 704ff.] zur Erfassung der benötigten Kennzahlen.

Eine detaillierte Aufschlüsselung der per MMH oder Prozessaufnahme ermittelten Zeitan-teile bietet die Methode nach Tietze [Tiet17, S. 31ff.]. Sie ordnet die beobachteten sogenannten Mitarbeiterzustände jeweils einer Phase eines generischen Arbeitszyklus zu. Dieser besteht aus:

- Informationsbeschaffung und -verarbeitung
- Material- und Hilfsmittelbeschaffung
- Bauteil- und Bauplatzvorbereitung
- Durchführung
- Nachbereitung

Jeder Mitarbeiterzustand setzt sich aus der ausgeführten Tätigkeit (bspw. *Messen*) und dem Objekt (bspw. *Rohr*) zusammen, an dem der beobachtete Mitarbeiter die Tätigkeit ausführt. Aus der Kombination von Tätigkeiten und Objekten ergibt sich eine Tätigkeits-Objekt-Matrix (TOM), in der alle gültigen Mitarbeiterzustände verzeichnet sind (*Vorgesetzten schweißen* wäre bspw. im Gegensatz zu *Rohr messen* als ungültiger Zustand gekennzeichnet). Die TOM ist für jeden Anwendungsfall mit den Tätigkeiten und Objekten auszufüllen, die potenziell vorkommen [Tiet13, S. 195].

Das Verfahren erlaubt es, auch bei unterschiedlichem Arbeitsinhalt, wie er in der Unikatfertigung zwangsläufig vorliegt, die Anteile wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Tätigkeiten einander gegenüberzustellen und Potenziale abzuleiten. Das Verfahren wird bei der Evaluation des Konzepts dazu dienen zu ermitteln, ob sich der absolute Zeitanteil der Informationsphase senken lässt.

2.3.3 Qualität

Qualität ist definiert als „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt*“ [ISO9000, S. 18]. Die Merkmale beziehen sich im vorliegenden Falle der Unikatproduktion auf die produzierten Güter [ISO9000, S. 25]. Die Norm unterscheidet mehrere Klassen von Merkmalen: physikalische, sensorische, verhaltensbezogene, zeitbezogene, ergonomische und funktionale [ISO9000, S. 26]. Die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Fertigungsunterlagen enthalten im Wesentlichen Informationen, die einen korrekten Aufbau des Produkts ermöglichen sollen, haben also hauptsächlich Einfluss auf die physikalischen Produktmerkmale (bspw. mechanisch, elektrisch). Eine Verbesserung der Informationsversorgung sollte sich entsprechend in einem niedrigeren Anteil fehlerhaft produzierter Leistungseinheiten niederschlagen. Stellt ein Unternehmen die Fehlerhaftigkeit einer Leistungseinheit fest, kann es diese entweder als Ausschuss behandeln und entsorgen oder die Fehler durch Nacharbeit korrigieren. Der Ausschuss eines Prozesses ist hierbei definiert als das Verhältnis zwischen fehlerhaft und insgesamt produzierten Leistungseinheiten [Herr16, S. 102]:

$$A = \frac{L_F}{L_{Ges}} \quad (4)$$

A	Ausschuss eines Prozesses
L_F	Anzahl fehlerhaft produzierter Leistungseinheiten
L_{Ges}	Anzahl gesamt produzierter Leistungseinheiten

Vor allem bei weit fortgeschrittenem Produktionsstatus ist es jedoch wirtschaftlich meist sinnvoller, stattdessen Nacharbeit zu veranlassen. Diese äußert sich in Material- und Lohnkosten für die Korrektur der fehlerhaften Leistungseinheit. Im Evaluationsteil dieser Arbeit dient die Anzahl der verursachten Fehler – die letztlich zu Nacharbeit führen würden – als Kennzahl für eine etwaige Verbesserung der Prozessqualität.

2.3.4 Zeit

Die Durchlaufzeit eines Auftrags ist als die Zeit definiert, die zwischen dessen Freigabe und seinem Bearbeitungsende verstreicht [Wien97, S. 33ff.]. In der Auftragsfertigung – und damit auch in der Unikatproduktion – hat die Durchlaufzeit Einfluss auf die Lieferzeit, da sie deren Untergrenze darstellt [Lödd16a, S. 32]. Die Durchlaufzeit setzt sich zusammen aus der Übergangszeit (Warten und Transport) und der Durchführungszeit [Wien97, S. 51]. (Anmerkung: Die Durchführungszeit bezeichnet nicht die Dauer der Durchführungsphase nach Tietze [Tiet17, S. 33]). Da das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Konzept auf die Verbesserung der Informationsversorgung bei manuellen Tätigkeiten abzielt, ist deutlich, dass sich ausschließlich die Durchführungszeit reduzieren lässt. Dies ist in der Evaluation durch Zeitaufnahmen zu überprüfen.

3 Informationsversorgung in der Unikatproduktion

Multimomentaufnahmen bei mehreren Unikatproduzenten haben ergeben, dass Mitarbeiter der direkten Bereiche zirka 30 Prozent ihrer Anwesenheitszeit mit Informations-tätigkeiten verbringen [Tiet17, S. 97] [Lödd16b, S. 180] [Bode15, S. 31]. Damit nimmt die Informationsphase in der Unterteilung nach Tietze [Tiet17, S. 33] den größten Teil der Arbeitszeit ein und erweist sich als potenzialträchtiges Feld für Produktivitätsgewinne. Darüber hinaus kann eine verbesserte Informationsversorgung die Qualität erhöhen sowie Kosten und Material einsparen. Das vorliegende Kapitel analysiert die Informationsbeschaffung in der Unikatfertigung, identifiziert ihre Defizite und zeigt Potenziale auf, die sich vor allem durch den Einsatz neuer Technologien ausschöpfen lassen.

3.1 Analyse der Informationsversorgung

Die Informationsversorgung für Mitarbeiter der Unikatfertigung unterscheidet sich in zwei wesentlichen Punkten von anderen Fertigungsarten:

- Die Informationserstellung kann parallel zur Fertigung stattfinden.
- Eine erstellte Information findet in der Regel nur einmalig Verwendung.

Um kurze Durchlaufzeiten zu erreichen, finden Konstruktion, Arbeitsplanung und Fertigung gleichzeitig statt. Die Arbeitsplanung stellt die Fertigungsinformationen typischerweise tagesgerecht für die jeweils zu fertigenden Produktteile bereit. Damit sind bei Fertigungsbeginn noch nicht alle Informationen für das Gesamtprodukt verfügbar, Unsicherheiten in der Konstruktion und Planung können auch zu konstruktiven Änderungen an den Produktteilen führen, die sich bereits in der Produktion befinden.

Bei Fertigungsarten mit höherer Stückzahl verwenden Mitarbeiter die einmal erstellten Fertigungsinformationen für jedes Stück der Serie. In der Unikatfertigung wenden die Mitarbeiter die produktspezifisch erzeugten Informationen üblicherweise nur einmalig – und ggf. ein zweites Mal bei der Qualitätskontrolle – an und benötigen sie im Anschluss nicht wieder. Daraus resultiert ein im Vergleich zu anderen Fertigungsarten höheres Verhältnis von Informationserstellung zu Informationsnutzung.

Aus beiden Eigenschaften der Informationsversorgung für die Unikatproduktion resultiert, dass Unikatfertiger pro Produkt weitaus weniger Aufwand für die Erstellung, Aufbereitung und Bereitstellung von Fertigungsinformationen aufbringen als Serienfertiger. Dies kann dazu führen, dass Mitarbeitern der Produktion Fertigungsinformationen fehlen oder dass die vorhandenen Informationen unverständlich sind.

3.1.1 Informationsprozess

Tietze fasst Mitarbeitertätigkeiten, die der Informationsversorgung dienen, als Informationsbeschaffung und -verarbeitung zusammen [Tiet17, S. 35ff.]. Die Bezeichnung eignet sich für den Zweck der Messung der Produktivität und der Aufschlüsselung der Mitarbeitertätigkeiten. Um zu untersuchen, welche Vorgänge im Detail bei der Informationsversorgung ablaufen, ist der Begriff allerdings nicht trennscharf genug. Insbesondere ist die Grenze zwischen physischen und kognitiven Vorgängen unklar, sodass es schwerfällt, konkrete Verbesserungsmaßnahmen in der Informationsversorgung abzuleiten. Für eine detaillierte Analyse der Informationsaktivitäten schlägt die vorliegende Arbeit eine Detaillierung der Informationsphase vor – einen Informationsprozess, der aus den vier Schritten *Informationssuche*, *Informationsbeschaffung*, *Informationserfassung* und *Informationsinterpretation* besteht. Abbildung 13 stellt den Prozess der Informationsphase nach Tietze gegenüber.

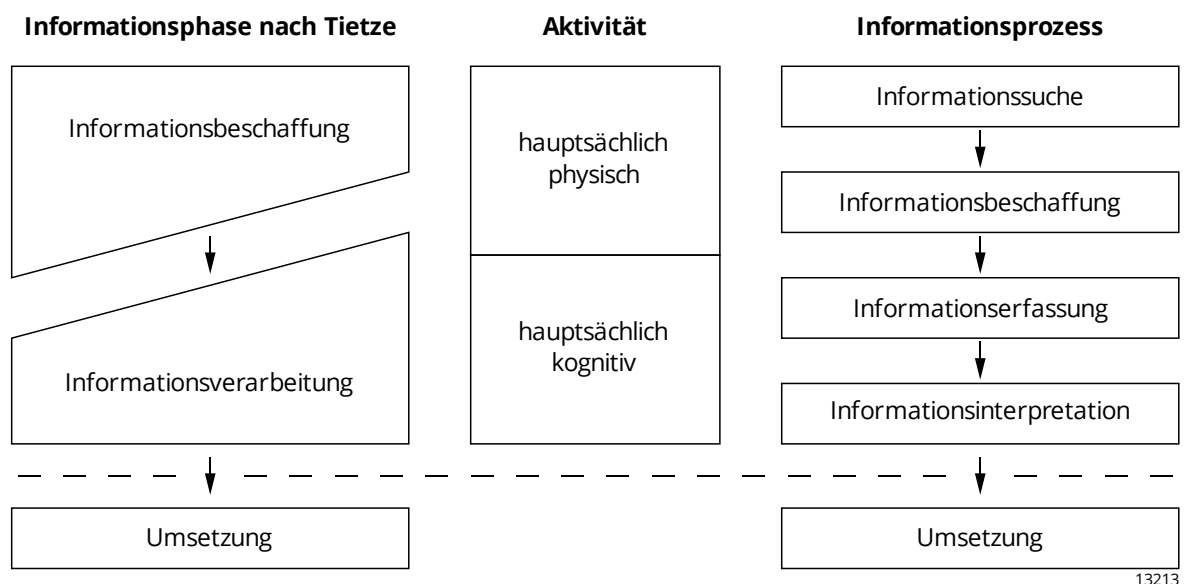


Abbildung 13: Vergleich des Informationsprozesses mit der Informationsphase nach Tietze

Der Prozess startet, sobald der Mitarbeiter Informationen zur Ausführung einer Tätigkeit benötigt. Aufgrund der Vielzahl an Informationsquellen (Zeichnungen, Anleitungen, CAD-Terminals etc.) muss er zunächst klären, welche Quelle die Information enthält und an welchem physischen Ort sie sich befindet (Informationssuche). Sofern er die Informationsquelle nicht mit sich führt, sucht er deren Ort auf (Informationsbeschaffung). Liegt ihm die Informationsquelle vor, beginnt der kognitive Teil des Prozesses: Da Informationsquellen in der Regel mehr Informationen als benötigt enthalten, filtert der Mitarbeiter die Informationsquelle (Informationserfassung). Um die Information schließlich umsetzen zu können, muss er sie interpretieren und verstehen (Informationsinterpretation).

3.1.2 Modell suboptimaler Informationsbereitstellung

Eine suboptimale Bereitstellung der Informationen für Fertigungsmitarbeiter kann den Ablauf des Informationsprozesses stören, sodass einzelne Schritte sich verlängern oder fehlschlagen. Die Informationsbereitstellung kann suboptimal sein, wenn Informationen fehlen oder sie für einen Fertigungsmitarbeiter missverständlich oder unverständlich dargestellt sind.

Der folgende Abschnitt analysiert die Auswirkungen solcher *unzulänglicher Informationen* auf die Zielgrößen Kosten, Zeit und Qualität. Dabei gilt die Annahme, dass eine in den direkten Bereichen fehlende Information entweder an anderer Stelle im Unternehmen vorliegt, oder Mitarbeiter die Information kognitiv erschließen können. Fehlt einem Fertigungsmitarbeiter eine Information, die weder im Unternehmen vorliegt noch kognitiv zu erschließen ist, wäre die erste Verbesserungsmaßnahme, die Information zu erstellen. Eine Verbesserung der *Informationsbereitstellung* kann dieses Problem nicht lösen, es liegt daher außerhalb des Fokus dieser Arbeit.

Abbildung 14 enthält ein Modell, das die möglichen Resultate suboptimaler Informationsbereitstellung qualitativ beschreibt. Die Grenze des Modells ist dabei direkt nach dem Fertigungsschritt gezogen. Kosten, Zeit und Qualität beziehen sich also auf das Produkt nach seiner Fertigstellung, jedoch vor einer möglichen folgenden Qualitätskontrolle.

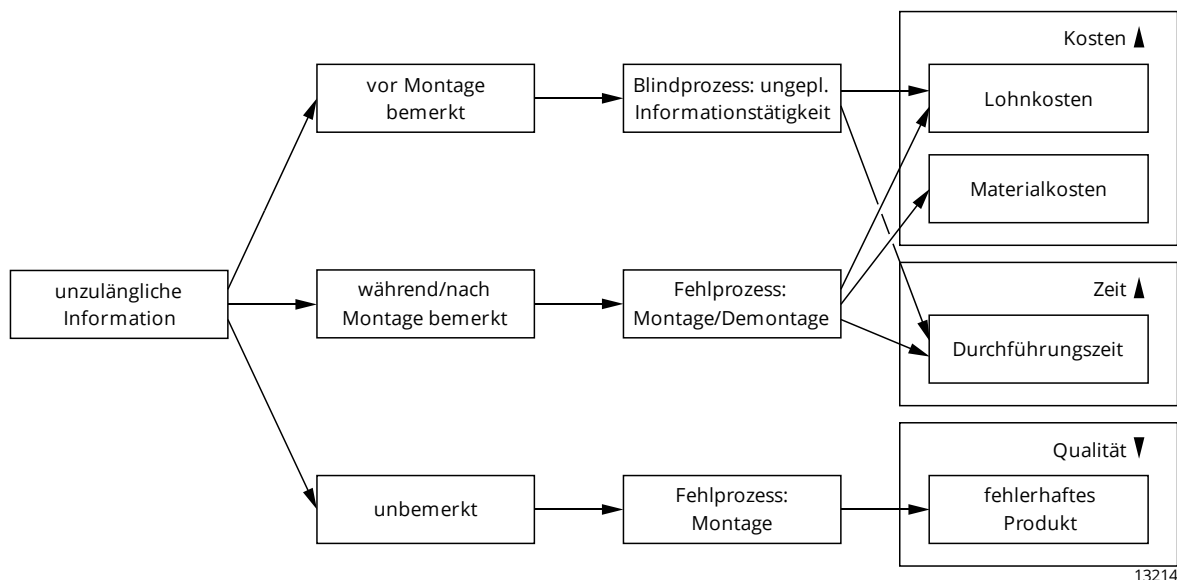


Abbildung 14: Auswirkungen unzulänglicher Informationen

Fall 1: Sofern der Mitarbeiter die Unzulänglichkeit einer Information vor der Montage bemerkt, muss er eine zusätzliche und nicht geplante Informationstätigkeit durchführen (ein Blindprozess [Winz15, S. 118 ff.]). Dies schlägt sich in einer längeren Durchführungszeit und höheren Lohnkosten nieder.

Fall 2: Beginnt der Mitarbeiter die Montagetätigkeit auf Basis unzulänglicher Informationen und bemerkt dies, muss er zusätzlich zu Fall 1 die fehlerhaft montierten Teile demontieren (Fehlprozesse) und erneut beginnen. Es entstehen hierbei weitere Lohnkosten und die Durchführungszeit erhöht sich. Lassen sich die demontierten Teile nicht wiederverwenden, kommen Materialkosten hinzu.

Fall 3: Bleibt die unzulängliche Information unbemerkt, verlässt das Produkt die Fertigung in einem fehlerhaften Zustand – die Qualität sinkt. Sofern spätere Qualitätskontrollen den Fehler aufdecken, geben sie Nacharbeit in Auftrag, die sich wie in Fall 2 – allerdings in höherem Maße (vgl. [Winz15, S. 8]) – auf Zeit und Kosten niederschlägt.

Die Fälle 1 und 2 lassen sich über die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte Messung der Verteilung der Mitarbeiterzustände erfassen, Fall 3 über die Auswertung der Protokolle späterer Qualitätskontrollen.

3.1.3 Produktivitätsaspekte

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, ergibt sich die Personalproduktivität aus dem Verhältnis zwischen Output und Input. Trennt man den Input auf in die Zeit, die Mitarbeiter für Informationstätigkeiten aufwenden (T_{Info}), und die übrige Zeit (T_{Rest}), ergibt sich folgende Gleichung für die Personalproduktivität P_P :

$$P_P = \frac{Output}{T_{Info} + T_{Rest}} \quad (5)$$

P_P	Personalproduktivität
$Output$	produzierte Leistungseinheiten
T_{Info}	Gesamtzeit für Informationstätigkeiten
T_{Rest}	Gesamtzeit für andere Tätigkeiten

Es ist zu erkennen, dass sich über die Verringerung von Informationstätigkeiten die Arbeitsproduktivität auf zwei Arten steigern lässt:

1. Pro aufgenommene Information müssen Mitarbeiter einen höheren Output (z. B. mehr Rohrmeter) erzeugen.
2. Die Zeit für Informationstätigkeiten pro Output muss sinken.

Das bedeutet für die Unikatfertigung im ersten Fall z. B. eine Prozessoptimierung hin zu standardisierten Bauteilen oder anderen Arbeitsabfolgen. Im zweiten Fall, den die vorliegende Arbeit behandelt, ist das Ziel, die Informationstätigkeiten so zu erleichtern, dass Mitarbeiter sie schneller erfüllen können. Hierzu ist zu analysieren, wie sich die Zeit für solche Tätigkeiten zusammensetzt, die entstehen, wenn Informationen fehlen.

Die Zeit für eine Informationstätigkeit ist die Zeit, die ein Mitarbeiter mit den Phasen des Informationsprozesses (Abschnitt 3.1.1) verbringt:

$$t_{Info,n} = t_{IS} + t_{IB} + t_{IE} + t_{II} \quad (6)$$

$t_{Info,n}$ Zeit für den gesamten Informationsprozess (für eine Information n)

t_{IS} Zeit für die Informationssuche

t_{IB} Zeit für die Informationsbeschaffung

t_{IE} Zeit für die Informationserfassung

t_{II} Zeit für die Informationsinterpretation

Bei einer Anzahl N_{Info} verschiedener Informationen, die ein Mitarbeiter benötigt, ergibt sich eine Gesamtzeit T_{Info} von:

$$T_{Info} = \sum_{n=1}^{N_{Info}} t_{Info,n} \quad (7)$$

N_{Info} Anzahl benötigter Informationen

Oder dargestellt mit den Durchschnittswerten für die einzelnen Informationsphasen:

$$T_{Info} = N_{Info} \cdot (\bar{t}_{IS} + \bar{t}_{IB} + \bar{t}_{IE} + \bar{t}_{II}) \quad (8)$$

$\bar{t}_{Ix}$ durchschnittliche Zeit für die Informationsphase x

Die Zeit für Informationstätigkeiten sinkt also dann, wenn

- a) die Anzahl an benötigten Informationen abnimmt,
- b) sich die Informationssuchzeit $\bar{t}_{IS}$ reduziert, bspw. durch eine geringere Anzahl unterschiedlicher Informationsquellen,
- c) kürzere Wegezeiten die Informationsbeschaffung $\bar{t}_{IB}$ beschleunigen,
- d) die Zeit für die Informationserfassung $\bar{t}_{IE}$ kürzer ausfällt, bspw. weil Mitarbeiter aus weniger Informationen die benötigte Information schneller herausfiltern können, oder
- e) die Informationen verständlicher dargestellt sind, sodass $\bar{t}_{II}$ sinkt.

Zustandsverteilung nach Tietze

Analysen der Verteilung der Mitarbeiterzustände nach Tietze [Lödd16b, S. 180] in unterschiedlichen Bereichen mehrerer Unikatfertiger zeigen, dass Informationstätigkeiten ca. 30 Prozent der bezahlten Arbeitszeit der Fertigungsmitarbeiter ausmachen. Die exemplarische Tätigkeits-Objekt-Matrix in Abbildung 15 zeigt die Anteile aller Mitarbeiterzustände, die eine Informationstätigkeit widerspiegeln [Tiet17, S. 45]. Der Einfachheit halber sind solche Phasen des generischen Arbeitszyklus ausgelassen, die keine Informationstätigkeiten oder -quellen enthalten.

	Tätigkeit			
	sprechen	betrachten	messen	gehen zu*
Informations- quelle	–	7% Erfassung Interpretation	3% Interpretation	3% Suche Beschaffung
Mitarbeiter*	9% Suche Erfassung Interpretation	–	–	1% Suche Beschaffung
Bauteil	–	3% Interpretation	2% Interpretation	–

*nicht eindeutig der Informationsphase zuzuordnen

13215

Abbildung 15: Mitarbeiterzustände in der schiffbaulichen Fertigung und Zeitanteile

Der physische Anteil der Informationstätigkeiten (Suche und Beschaffung) zeigt sich vor allem in den Wegezeiten zu Informationsquellen, die Mitarbeiter auf sich nehmen müssen, wenn ihnen Informationen nicht vorliegen. In den Beobachtungen sind nur die Zeiten für den Hinweg zu den Informationsquellen oder anderen Mitarbeitern, nicht aber für den Rückweg erfasst, da aus den verwendeten Multimomentaufnahmen keine Rückschlüsse möglich sind, von woher ein Mitarbeiter an seinen Arbeitsplatz zurückkehrt. Die in Abbildung 15 festgehaltenen Werte von drei bzw. einem Prozent sind auf Basis der Annahme berechnet, dass die Zeit für den Hinweg der Zeit für den Rückweg entspricht.

Der kognitive Teil der Informationsphase findet dann statt, wenn Mitarbeiter Informationsquellen oder Werkstücke betrachten, um unzulängliche Informationen (bspw. die dreidimensionale Lage eines geometrisch komplexen Bauteils) zu ermitteln. Auch die Kommunikation mit anderen Mitarbeitern, ebenso wie das Messen in Zeichnungen und die Bedienung von EDV-Geräten wie CAD-Terminals, dienen der Informationserfassung und -interpretation.

Um Verbesserungsmaßnahmen für die Informationsversorgung ableiten zu können, sind weitere Kenntnisse über die Verteilung der Zeitanteile auf die vier Informationsphasen notwendig. In der Praxis lässt sich auf Basis des Multimomenthäufigkeitsverfahrens nicht immer mit Sicherheit feststellen, ob der beobachtete Zustand tatsächlich der Informationsphase zuzuordnen ist. Nicht-eindeutige Mitarbeiterzustände sind in Abbildung 15 gekennzeichnet (*); so können zwischen Mitarbeitern auch nicht-fachliche Gespräche auftreten; Messen an Bauteilen kann ebenfalls eine Vorbereitungstätigkeit sein; zurückgelegte Wege, die zwar der Informationsbeschaffung oder Suche dienen, lassen sich in bestimmten Fällen auch mit weiteren geplanten Tätigkeiten verbinden. Die Verteilung der Mitarbeiterzustände gibt dementsprechend einen Aufschluss über die Ausgangssituation der Informationsbereitstellung eines Unternehmens und deutet darauf hin, in welchen Phasen das meiste Verbesserungspotenzial besteht. Da den Zahlen eine Unsicherheit zugrunde liegt, sind für die Phasen jeweils drei Daten angegeben: Die Untergrenze des Anteils

einer Informationsphase ergibt sich hierbei aus der Summe der Anteile aller Zustände, die sich der Phase eindeutig zuordnen lassen; die Obergrenze aus der Summe der Anteile, die sich zusätzlich auch anderen Phasen zuordnen lassen könnten; für die Abschätzung sind die Anteile eines Mitarbeiterzustands zu gleichen Teilen auf dessen mögliche Informationsphasen verteilt. Lässt sich ein Zustand also drei Informationsphasen zuordnen, erhält jede der Informationsphasen ein Drittel des Anteils. Abbildung 16 zeigt dies für das zuvor dargestellte Beispiel: Der hauptsächlich kognitive Anteil der Informationstätigkeiten fällt höher aus als der physische, es überwiegt die Informationsinterpretation.

Phase	Anteil minimal	Anteil maximal	Anteil abgeschätzt
Informationssuche	0 %	13 %	5 %
Informationsbeschaffung	0 %	4 %	2 %
Informationserfassung	0 %	16 %	6,5 %
Informationsinterpretation	8 %	24 %	14,5 %

13216

Abbildung 16: Abschätzung der Anteile der Informationsphasen (Mehrdeutige Zustände zählen zu gleichen Teilen zu den jeweiligen Phasen.)

Beitrag einzelner Informationen zum Aufwand

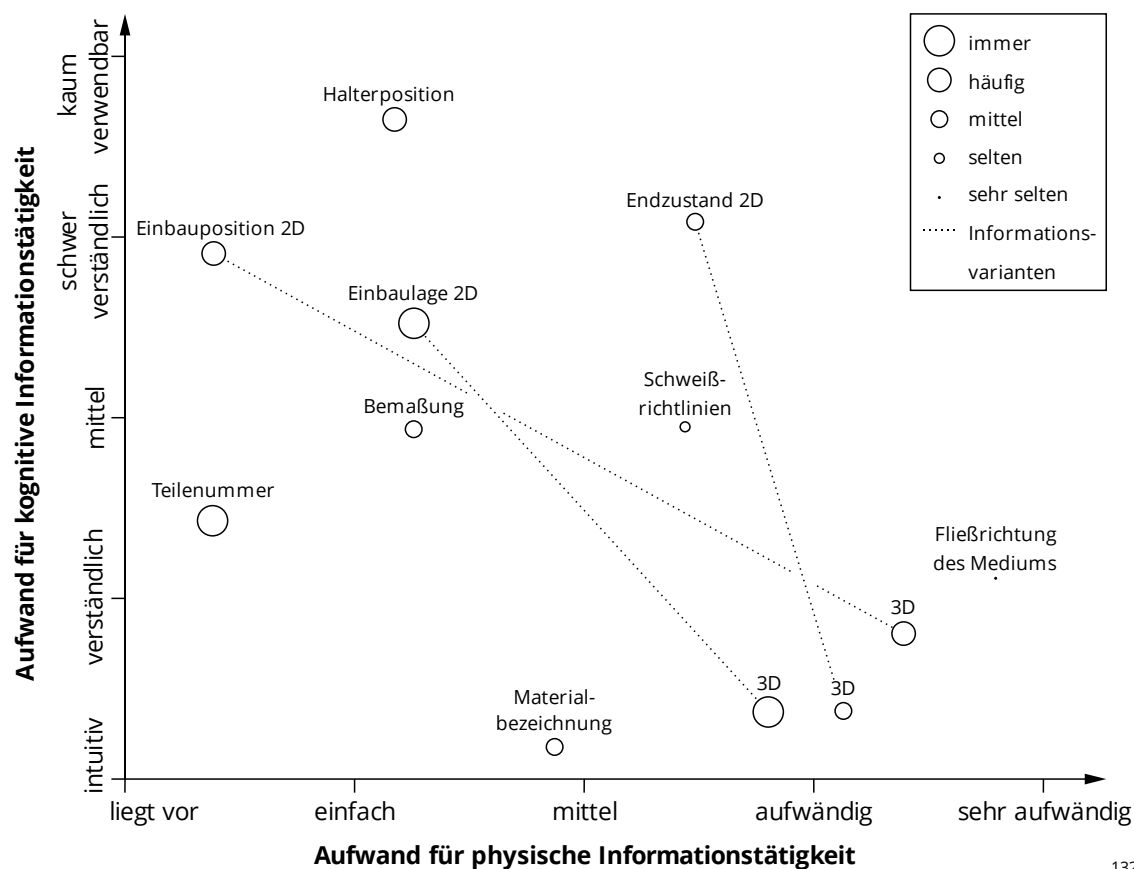
Für eine Verbesserung der Informationsbereitstellung ist detaillierteres Wissen darüber erforderlich, welche Informationen wie stark zum Aufwand für Informationstätigkeiten beitragen. Fertigungsmitarbeiter durchlaufen den Informationsprozess bei ihrer täglichen Arbeit. Sie sind daher die Personengruppe, die den Aufwand für die Tätigkeiten am besten beschreiben kann. Ziel ist es, pro Information n die Zeitanteile $t_{lx,n}$ für die einzelnen Prozessphasen zu quantifizieren. Für eine möglichst einfache Durchführung der Befragung und, um den Mitarbeitern die Unterscheidung zu erleichtern, sind die Phasen Informationssuche und -beschaffung als physische und die Phasen Informationserfassung und -interpretation als kognitive Informationstätigkeit zusammengefasst. Folgende drei Fragen ermitteln ein Gesamtbild zu einer Information, wobei vorgegebene Antwortmöglichkeiten das Vorgehen weiter vereinfachen:

1. Wie häufig ist die Information erforderlich?
(*sehr selten – selten – mittel – häufig – immer*)
2. Wie aufwändig ist es, die Information zu beschaffen?
(*liegt vor – einfach – mittel – aufwändig – sehr aufwändig*)
3. Wie verständlich ist die Information in ihrer momentanen Darstellungsform?
(*intuitiv – verständlich – mittel – schwer verständlich – kaum verwendbar*)

Über den Durchschnitt der Antworten mehrerer Befragter ergibt sich ein Bild davon, welche Informationen den größten Aufwand für Informationstätigkeiten ausmachen.

Zur Validierung des Verfahrens fanden umfangreiche Befragungen in mehreren Ausrüstungsbereichen zweier Werften sowie in der Schaltschrankmontage statt. Exemplarische Ergebnisse einer der Befragungen im Schiffbau sind in Abbildung 17 festgehalten und in Relation zueinander gesetzt: Die Größe des Punkts gibt die Häufigkeit der jeweiligen Information an (Frage 1) – je größer, desto häufiger ist eine Information erforderlich; die X-Achse beschreibt den physischen Aufwand, eine Information zu beschaffen (Frage 2), die Y-Achse den kognitiven Aufwand (Frage 3). In manchen Fällen stehen Mitarbeitern unterschiedliche Quellen für eine Information zur Verfügung. Dies ist bspw. dann der Fall, wenn die Mitarbeiter Papierzeichnungen mit sich führen, aber auch Zugriff auf ein CAD-Terminal haben, das sich an einem festen Standort in der Produktion oder in einem Meisterbüro befindet. Hierbei müssen Mitarbeiter häufig eine Abwägung treffen zwischen kognitivem Aufwand zum Verstehen eines unklaren Sachverhalts in der 2D-Darstellung oder physischem Aufwand, der entsteht, wenn sie den Weg zum CAD-Terminal zurücklegen, um eine intuitivere 3D-Darstellung aufzurufen. Hiervon betroffene Informationen sind in der Abbildung mit gepunkteten Linien verbunden.

Befindet sich eine Information im Ursprung des Diagramms, so liegt sie dem Mitarbeiter der Fertigung vor, und er kann sie intuitiv anwenden. Dieser Idealzustand gilt im Beispiel für keine der Informationen, ist aber bspw. in der Massenproduktion erreichbar.



13217

Abbildung 17: Aufwand für physische (X-Achse) und kognitive (Y-Achse) Informationstätigkeiten in der Sektionsausrüstung im Schiffbau

Aus der Darstellung lässt sich sowohl ablesen, welche Informationen die wesentlichen Anteile an Informationstätigkeiten verursachen (großer Punkt und weite Entfernung vom Ursprung), als auch die notwendige Maßnahme, die diesen Zustand verbessern kann: Für Informationen im oberen Bereich des Diagramms ist dafür zu sorgen, dass die Verständlichkeit steigt, für die Informationen im rechten Bereich ist die Verfügbarkeit für die Mitarbeiter der Fertigung zu verbessern. Dabei sind solche Informationen priorisiert zu behandeln, die die Mitarbeiter häufiger verwenden.

Die Mitarbeiter einer Schaltschrankmontage beantworteten den Fragebogen nach der gleichen Systematik (Abbildung 18). Auffällig ist, dass vor allem die Klemmenposition (i. e. der Anschlusspunkt eines Drahtendes) in den verwendeten Unterlagen sehr schwer verständlich dargestellt ist. Dies liegt an dem Aufbau des Schaltplans, der sich nicht an der geometrischen Anordnung der Komponenten im Schaltschrank orientiert, sondern die Verbindungen zwischen den Komponenten rein logisch darstellt, sodass es den Mitarbeitern schwerfällt, die betroffenen Komponenten und deren Klemmen im realen Schaltschrank zu lokalisieren.

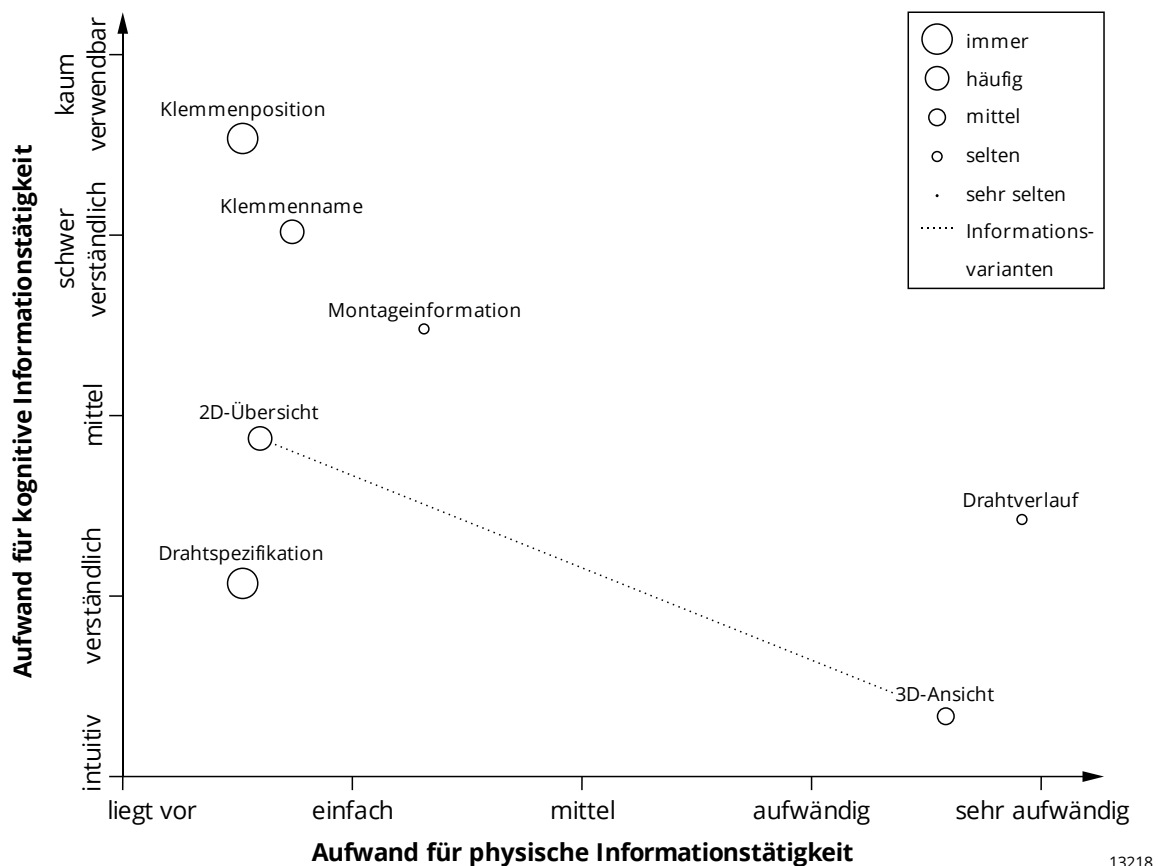


Abbildung 18: Aufwand für physische (X-Achse) und kognitive (Y-Achse) Informationstätigkeiten in der Schaltschrankmontage

3.1.4 Qualitätsaspekte

Der Ausschuss eines Prozesses ist definiert als Verhältnis zwischen fehlerhaft und insgesamt produzierten Leistungseinheiten (vgl. Abschnitt 2.3.3). Teilt man diese auf in solche, die ein Mitarbeiter aufgrund einer unzulänglichen Informationslage fehlerhaft erstellt hat, und solche, die aufgrund anderer Ursachen fehlerhaft sind, ergibt sich folgende Gleichung:

$$A = \frac{L_{F,Info}}{L_{Ges}} + \frac{L_{F,Rest}}{L_{Ges}} \quad (9)$$

A	Ausschuss eines Prozesses
$L_{F,Info}$	Anzahl aufgrund der Informationslage fehlerhafter Leistungseinheiten
$L_{F,Rest}$	Anzahl aufgrund anderer Ursachen fehlerhafter Leistungseinheiten
L_{Ges}	Gesamtanzahl produzierter Leistungseinheiten

Sofern es wirtschaftlich sinnvoller ist, fehlerhafte Leistungseinheiten zu korrigieren, entsteht analog hierzu anstelle des Ausschusses Nacharbeit – entweder aufgrund der Informationslage oder aufgrund anderer Ursachen. Für eine Bewertung der Qualitätsaspekte der Informationsversorgung sind also zusätzlich zur Fehlerhäufigkeit, die üblicherweise aus den Protokollen einer abschließenden Qualitätskontrolle hervorgeht, Kenntnisse über die Ursachen der Fehler erforderlich. Diese lassen sich durch Befragung der Beteiligten (Mitarbeiter der Fertigung oder Meister) feststellen, um zwischen informationsbezogenen (Kennzahl $L_{F,Info}$) und sonstigen Fehlerursachen ($L_{F,Rest}$) differenzieren zu können.

Es besteht hierbei die Gefahr, Mitarbeiter durch die Art der Fragestellung ungewollt so zu beeinflussen, dass sie in jedem Fehler ein Resultat unzulänglicher Informationen sehen. Dem ist mit offenen Fragen zuvorzukommen („*Welche möglichen Ursachen gibt es für diesen Fehlertyp?*“ statt „*Ist der Fehler aufgrund der Informationen entstanden?*“). Die Ergebnisse der Befragung sind zudem kritisch zu bewerten: Angaben der Mitarbeiter über unverständliche oder nicht vorhandene Informationen sind auf Plausibilität und Konsistenz zu überprüfen – ggf. auch mit Meistern –, um zu verhindern, dass aus einer möglichen Unwissenheit Einzelner der Schluss entsteht, die Informationslage sei unzulänglich. Abbildung 19 stellt exemplarisch die Fehlertypen aus einem Protokoll der Qualitätskontrolle den von Fertigungsmitarbeitern beschriebenen Ursachen gegenüber.

Fehlteile machen im Beispiel nahezu die Hälfte aller Fehler aus. Als Ursache dafür identifizierten die Mitarbeiter logistische Probleme bei der Anlieferung der Teile, sodass diese nicht für den Einbau bereitstanden. Exemplarisch für nicht konstruierte und damit in den Zeichnungen nicht eingetragene Bauteile sind Rohrhalter, deren Fehlen etwa ein Zehntel der Fehler ausmacht. Die Mitarbeiter der Fertigung gaben als Grund Unklarheiten über die Einbaurichtlinien der Halter an. Rohrverschlüsse, die die Mitarbeiter an offene Rohrenden setzen sollen, sind ein weiteres Beispiel für Bauteile, die nicht in den Arbeitsunterlagen dargestellt sind und deshalb oftmals fehlen. Nicht eingehaltene Abstände (bspw. zwischen

Rohren und Haltern) führen die Mitarbeiter auf den fehlenden Überblick über spätere Einbauten zurück. In vielen Fällen sind Bauteile in einer falschen geometrischen Ausrichtung oder entgegen ihrer Eigenschaften (bspw. der Fließrichtung des Mediums in einem Rohr) eingebaut. Die Ursachen hierfür identifizieren die Mitarbeiter in fehlenden Informationen in den Unterlagen (Fließrichtung) und in geometrischen Fehlinterpretationen der zweidimensionalen Zeichnungen.

Fehlerprotokoll		in Mitarbeiterbefragung ermittelte mögliche Ursachen		
Anteil	Fehlertyp	physisches Informationsproblem	kognitives Informationsproblem	andere Ursachen
45 %	Bauteil fehlt	–	–	Logistik
10 %	Halter fehlt	Richtlinie nicht gefunden	Richtlinie missverstanden	–
6 %	Endstück fehlt	Information fehlt	Rohrende übersehen	–
6 %	falsche Höhe	Maß nicht eingetragen	Information missverstanden	am Werkstück vermessen
5 %	Schweißfehler	Richtlinie nicht gefunden	Richtlinie missverstanden	Ausführungsfehler
5 %	Abstand nicht eingehalten	Endzustand unbekannt	Endzustand nicht beachtet	–
5 %	falsche Position	–	in Zeichnung vermessen	am Werkstück vermessen
4 %	falsche Ausrichtung	–	2D-Information missverstanden	–

13219

Abbildung 19: Verknüpfung zwischen häufig auftretenden Fehlern und deren möglichen Ursachen

Insgesamt identifizierten die Mitarbeiter die Informationslage als ausschließliche Ursache für 25 Prozent der Fehler und konnten sie für weitere 16 Prozent der Fehler nicht als mögliche Ursache ausschließen. Die Informationslage ist demnach nach der Logistik der Hauptgrund für Fehler. Betrachtet man die Informationen, die nach Angabe der Mitarbeiter fehlen, um die Aufgaben korrekt auszuführen, und trägt sie in die Informationsübersicht aus Abbildung 17 ein, zeigt sich, dass vor allem solche Informationen zu Fehlern führen, die aufwändig zu beschaffen und/oder schwierig zu verstehen sind (Abbildung 20, oberhalb der gestrichelten Linie).

Um die Fehlerrate mit einer verbesserten Informationsbereitstellung zu senken, bieten sich zwei Hebel:

- physisch: Erleichtern der Zugänglichkeit zu Informationen in Form von Klarheit über deren Informationsquelle und in Form vom kurzen Wegen zu den entsprechenden Informationsquellen
- kognitiv: Vereinfachung der Auffassung von Informationen in Form von Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit

Diese stehen im Einklang mit den im vorangegangenen Abschnitt herausgearbeiteten Stellschrauben zur Steigerung der Produktivität.

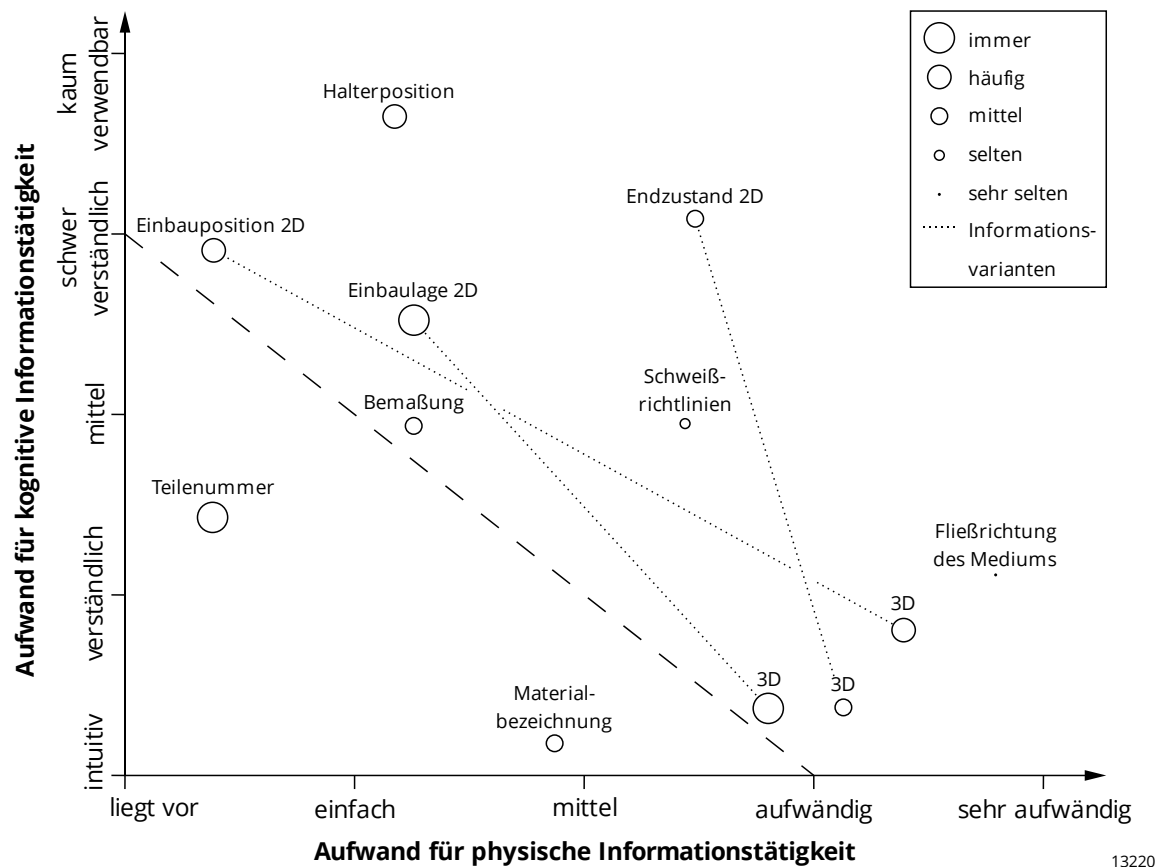


Abbildung 20: Für Fehler verantwortliche Informationen nach Aufwand für physische (X-Achse) und kognitive (Y-Achse) Informationstätigkeiten

3.2 Informationsdefizite in der Unikatproduktion

Der vorangegangene Abschnitt hat die Auswirkungen unzulänglicher Informationen dargestellt. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Ursachen für unzulängliche Informationen. Abschnitt 3.2.1 beschreibt die Defizite der momentanen Versorgung der Fertigung mit Informationen und führt diese auf eine Hauptursache zurück: die Verwendung des statischen Mediums Papier (vgl. [Hala14b, S. 492ff.]). Abschnitt 3.2.2 untersucht die Auswirkungen des Informationsmediums Papier auf die Rückmeldung von Informationen und deckt auch hier Defizite auf. Abschnitt 3.2.3 erklärt, warum andere Medien bisher noch nicht geeignet waren, in der Unikatfertigung die papierbasierte Informationsversorgung abzulösen.

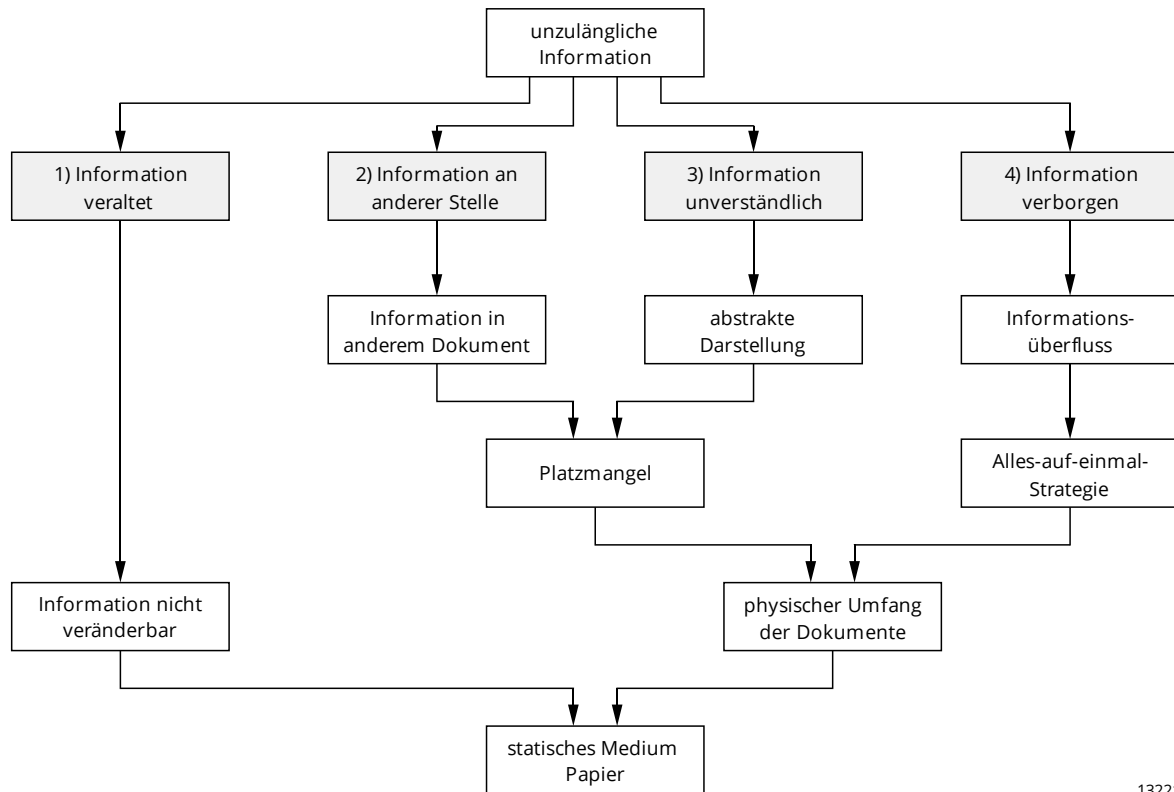
3.2.1 Defizite der papierbasierten Informationsbereitstellung

Die in den Befragungen der Fertigungsmitarbeiter identifizierten Gründe für unzulängliche Informationen lassen sich in vier Kategorien einteilen:

1. Die Information ist veraltet:
Findet zwischen der Erstellung der Fertigungsunterlagen und der Fertigung eine Konstruktionsänderung statt, veralten die Unterlagen. Sofern die indirekten Bereiche die Änderung nicht weitergeben, fehlen den Fertigungsmitarbeitern die aktuellen Informationen. Diese müssen sie sich selbst beschaffen, sodass die Zeit für die Informationssuche und -beschaffung steigt.
2. Die Information befindet sich an einer anderen Stelle:
Mitarbeiter der Fertigung müssen Informationen teilweise mehreren Quellen entnehmen und sie verknüpfen. Hierdurch steigen die Aufwände für die Informationserfassung und -interpretation. Oftmals befindet sich die zusätzliche Informationsquelle an einem anderen Ort, weil nur ein Exemplar (bspw. im Meisterbüro) existiert, oder die Informationsquellen in ihrer Gesamtheit zu umfangreich sind, um sie mitzuführen (bspw. Unterlagenordner). In diesem Fall steigt ebenfalls die Zeit für die Informationssuche und -beschaffung.
3. Die Information ist unverständlich dargestellt:
Um Platz zu sparen, sind dreidimensionale Geometrien in Zeichnungen auf eine zweidimensionale Darstellung heruntergebrochen oder Verdrahtungsinformationen in Schaltplänen ohne geometrischen Bezug dargestellt, sodass Mitarbeiter die Informationen zunächst interpretieren müssen. Maße sind in den Unterlagen z. T. nur implizit vorhanden, Mitarbeiter müssen diese mit einem Maßstabslineal bestimmen. Die abstrakte Repräsentation der Information steigert gegenüber einer intuitiven Darstellungsform den Aufwand für die Informationsinterpretation. (Anmerkung: Die Information ist ggf. in einer anderen Quelle – bspw. einem CAD-Terminal – in verständlicherer Form vorhanden, der Mitarbeiter müsste sie allerdings suchen und beschaffen, vgl. Kategorie zwei.)
4. Die Information ist innerhalb der Arbeitsunterlage verborgen:
Der Mitarbeiter kann die benötigte Information nicht direkt in der Arbeitsunterlage sehen und muss sie zwischen vielen anderen Informationen suchen. Es entsteht zusätzlicher Aufwand für die Informationserfassung.

Bis auf Kategorie eins, die lediglich einen Mehraufwand an Informationsbeschaffung verursacht, enthalten alle Kategorien Elemente, die nach der Cognitive Load Theory von Chandler und Sweller zu einer erhöhten extrinsischen – durch die Form der Instruktionen bedingten – kognitiven Belastung führen. Hierzu zählen die Verknüpfung von Informationen aus mehreren Quellen in Kategorie zwei [Chan91, S. 297-309], eine ungeeignete Darstellung der Informationen in Kategorie drei [Chan94, S. 303-304] und das Filtern relevanter Informationen aus einer größeren Menge in Kategorie vier [Maye03, S. 48].

In Abbildung 21 sind die für die vier Kategorien ermittelten Gründe dargestellt. Nach Anwendung der 5-Why-Methode [Ohno88, S. 17] ergibt sich ein ursächlicher Grund für unzulängliche Informationen: Die Verwendung von Papier, einem statischem, unveränderlichen Medium zur Informationsversorgung.



13221

Abbildung 21: Ursachenanalyse für fehlende Informationen

Aus dem statischen Medium Papier ergeben sich zwei wesentliche Nachteile: Informationen lassen sich nach der Bereitstellung für die Fertigung nicht mehr verändern, und der physische Umfang (Größe, Gewicht) der Fertigungsunterlagen ist proportional zur Menge der benötigten Informationen. Vor allem der zweite Nachteil führt zu Problemen: Da Mitarbeiter der Fertigung nur einen begrenzten Umfang an Fertigungsunterlagen mit sich führen können, entsteht ein Platzmangel für die Informationen. Aus dem Platzmangel ergeben sich zwei jeweils suboptimale Alternativen: Die (nach Möglichkeit am seltensten genutzten) Informationen sind in andere Dokumente ausgelagert und nicht direkt verfügbar, andere Informationen sind abstrakt und damit platzsparend dargestellt, bergen jedoch die Gefahr, unverständlich zu sein.

Der begrenzte physische Umfang der Fertigungsunterlagen bewirkt neben dem Platzmangel, dass die Unterlagen möglichst viele Informationen auf einmal darstellen und ein Informationsüberfluss entsteht, in dem sich die Mitarbeiter der Fertigung nicht schnell genug zurechtfinden.

Aus den Nachteilen der statischen Darstellung der Informationen auf Papier ergibt sich der Bedarf, den Mitarbeitern der Fertigung die Informationen über ein dynamisches, interaktives Medium zu vermitteln, wie bspw. tragbare Tablet-Computer.

3.2.2 Rückmeldung von Informationen

Entsprechend der Informationsversorgung erfolgt auch die Rückmeldung von Informationen – wenn überhaupt – auf Papier. Der Detailgrad ist dabei unterschiedlich und reicht von der gesammelten Rückmeldung eines großen Arbeitspakets bis hin zur Rückmeldung auf Teilebene. Eine separate Prüfung der Vollständigkeit nehmen bspw. Mitarbeiter der Qualitätskontrolle im Nachhinein vor. Insgesamt ergeben sich die folgenden Probleme:

- Die Rückmeldung erfolgt mit Verzögerung zur tatsächlichen Fertigstellung eines Arbeitsschritts. Entsprechend spät können die indirekten Bereiche reagieren – bspw. mit der Freigabe von Aufträgen oder der Neubestellung fehlender Bauteile.
- Der genaue Bearbeitungsstand ist nicht bekannt. Mitarbeiter indirekter Bereiche verbringen z. T. einen erheblichen Anteil ihrer Arbeitszeit in den direkten Bereichen, um den Bearbeitungsstand zu ermitteln.
- Es ist schwierig, die Vorgabezeiten präzise zu schätzen, da Ist-Zeiten nur pro Arbeitspaket, nicht aber pro Arbeitsschritt zurückfließen. Hieraus entstehen Ungenauigkeiten bei der Planung, größere Pufferzeiten oder eine ungleichmäßige Auslastung.
- Aus aufgetretenen Problemen (bspw. logistischer Natur oder Konstruktionsfehlern) lassen sich keine Verbesserungsmaßnahmen ableiten, da es an einfachen Methoden zur Dokumentation und definierten Wegen zur Rückmeldung des Fehlers an dessen Quelle mangelt, die eine Einleitung von Verbesserungsmaßnahmen vereinfachen würden. Stattdessen beheben die Mitarbeiter der Fertigung die Fehler eigenständig; es entsteht eine Differenz zwischen dem Konstruktionsmodell und dem Produkt, deren Dokumentation der Auftraggeber ggf. einfordern kann.

3.2.3 Defizite digitaler Informationsbereitstellung

Abschnitt 2.2.4 stellt bestehende Anwendungen von digitalen Arbeitsunterlagen mit Augmented Reality in der Industrie dar. Hierbei zeigte sich bereits, dass geeignete AR-Anwendungen für die Unterstützung der Fertigung komplexer Produkte mit Unikatcharakter fehlen. Die bestehenden Anwendungen sind konzeptionell jeweils auf unterschiedliche Einsatzszenarien ausgelegt und lassen sich deshalb nicht umstandslos auf die vorliegende Problemstellung anpassen. Dies liegt vor allem an den im Folgenden erläuterten – für den jeweiligen Anwendungsfall plausiblen – Beschränkungen.

Manuelle Aufbereitung der Informationen

Viele der aufgeführten Anwendungen gehen davon aus, dass die manuelle Erstellung der Informationen (bspw. Arbeitsschrittfolgen in [Schr12, S. 238ff.]) in einem akzeptablen Verhältnis zur Nutzungshäufigkeit steht. Bei Produkten mit Unikatcharakter ist die Nutzungshäufigkeit einer Information jedoch selten höher als *einmal*. Somit fließt ggf. mehr Aufwand in die Informationserstellung, als sich bei der Informationsnutzung sparen lässt.

Fehlende Mobilität

Alle aufgeführten Fertigungsanwendungen und viele der weiteren Anwendungen weisen keine oder nur eine eingeschränkte Mobilität auf. Die Einblendung findet häufig auf einem Monitor an einem stationären Arbeitsplatz statt, wohingegen Mitarbeiter der Unikatfertigung häufig große Produkte oder Produktteile auf Bauplätzen fertigen. Die entsprechend höhere Mobilität stellt weitere Anforderungen an die Portabilität der Hardware und die Funktionalität des Trackings für Augmented Reality.

Vorgegebene Arbeitsprozesse

Die vorgestellten Anwendungen geben in der Regel einen einmal festgelegten Arbeitsprozess vor, dem einzelne Schritte und die damit verknüpften darzustellenden Informationen zugrunde liegen. In der Unikatfertigung besteht jedoch eine wesentlich höhere Flexibilität, die sich aus dem vergleichsweise niedrigen Detailgrad der Planung ergibt und die es den Mitarbeitern am Arbeitsplatz erlaubt, Entscheidungen über Reihenfolgen und ggf. auch Montagehierarchien festzulegen. Dies lässt sich in den bestehenden Anwendungen nicht abbilden.

Fehlende Bedienkonzepte für einen produktiven Einsatz

Daraus resultiert ebenfalls ein Mangel an Konzepten zur produktiven Bedienung von AR-Anwendungen, die den Fertigungsmitarbeitern Flexibilität in ihrer Arbeitsweise ermöglichen. Bestehende Anwendungen für den Fertigungseinsatz beschränken die Steuerung des Arbeitsprozesses auf den einfachen Fall, den aktuellen Arbeitsschritt vom Nutzer bestätigen zu lassen (oder ggf. die korrekte Ausführung automatisch zu erkennen) und zum nächsten Arbeitsschritt zu wechseln. Andere Anwendungen orientieren die Steuerung der Informationseinblendung am Strukturbaum des CAD-Modells, was zwar eine hohe Flexibilität ermöglicht, die Arbeitsweise der Mitarbeiter jedoch nur dann abbildet, wenn die CAD-Struktur der Fertigungsstruktur entspricht oder ihr sehr ähnlich ist. Es fehlen Bedienkonzepte, die sowohl Flexibilität in der Arbeitsweise als auch eine produktive Bedienung ermöglichen.

Keine Anzeige vielfältiger Informationen

Die beschriebenen Anwendungen spezialisieren sich jeweils auf die Anzeige weniger Informationstypen wie bspw. Geometrie- oder Textinformationen oder die Rückmeldung oder Überprüfung des Einbaustatus. In der Unikatfertigung benötigen die Mitarbeiter hingegen vielfältige Informationsquellen und -typen. Zusätzlich zur Anzeige der 3D-Bauteilgeometrien als Soll-Zustand in AR ist oftmals auch eine einfache 3D-Anzeige ohne AR sinnvoll, bspw. wenn der Mitarbeiter einen Überblick über ein großes Produktteil gewinnen möchte oder sich außerhalb des Bauplatzes befindet. Auch die Anzeige anderer als 3D-Informationen wie etwa Einbauanleitungen für Einkaufsteile in Dokumentenform kann hilfreich sein, da die Aufbereitung solcher Informationen für eine 3D- oder AR-Anzeige oft nicht lohnenswert ist. Ein schneller und situationsbezogener Zugriff auf solche Informationen ist Voraussetzung für einen produktiven Einsatz.

Fehlende Konzepte für flexible Datendistribution

Die Flexibilität der Unikatfertigung, die Komplexität der Produkte und das Simultaneous Engineering erfordern andere Konzepte für die Distribution der Daten auf die Endgeräte als die vorgestellten Anwendungen enthalten. Diese sehen vor, die Daten einmalig bzw. periodisch per Update auf die Geräte zu überspielen. In der Unikatfertigung benötigen die Mitarbeiter meist tagesaktuelle Daten, die sich ggf. noch während der Ausführung ihrer Arbeit ändern können. Zudem ist die Datenmenge entsprechend der Komplexität der Produkte (bspw. bei Schiffen oder Flugzeugen) sehr groß, sodass weder eine periodische manuelle Übertragung noch eine automatische Übertragung der gesamten Daten infrage kommen. Zudem muss, um das intellektuelle Eigentum der Unternehmen zu schützen, die Sicherheit der Daten auf den mobilen Endgeräten gewährleistet sein.

3.3 Abschätzung der Potenziale in der Informationsversorgung

Dieser Abschnitt beschreibt, welche Eigenschaften der AR-fähigen Geräte (bspw. Tablet-Computer, HMDs oder Projektoren) dazu beitragen können, die Informationsversorgung zu verbessern. Hierzu sind zunächst technologieunabhängige Potenziale beschrieben, die sich allein dadurch ergeben, dass ein dynamisches Anzeigemedium das statische Papier ersetzt, und im Anschluss technologiespezifische, die sich aus den Stärken und Schwächen der einzelnen Geräte ergeben. Die Potenziale sind dabei jeweils in Zusammenhang zu den in Abschnitt 3.1.3 analysierten Phasen des Informationsprozesses sowie den im Abschnitt 3.1.4 analysierten Fehlerarten gesetzt.

3.3.1 Allgemeine Potenziale

Unabhängig von der verwendeten Hardware bieten digitale Medien, die Informationen dynamisch anzeigen können, erhebliche Vorteile gegenüber Papierzeichnungen. Hieraus er-

geben sich Potenziale, die Informationsversorgung in der Fertigung effizienter und effektiver zu gestalten. Die wesentlichen Vorteile sind im Folgenden aufgeführt.

Aktualität und Verfügbarkeit der Informationen

Digitale Medien erleichtern es im Vergleich zu einem Ausdruck auf Papier, Fertigungsinformationen bereitzustellen, sie zu aktualisieren und sie ständig mitzuführen. Informationen lassen sich tagesaktuell auf die Geräte übertragen, sodass im Vergleich zur Erstellung der Papierunterlagen die Vorlaufzeit sinkt. Zudem entfällt das Lokalisieren und Einsammeln aller physischen Exemplare der Informationen bei Änderungen. Selbst die Speicherkapazität einfacher elektronischer Geräte genügt in der Regel, um sämtliche Fertigungsinformationen für ein Produkt vorzuhalten. Mitarbeitern der Fertigung bleiben Gänge zu Informationsquellen, wie bspw. stationären Computern oder dem Meisterbüro, erspart. Abbildung 22 stellt die Potenziale in den Kategorien Informationserstellung, Informationsnutzung und Fehlervermeidung dar.

Informationserstellung	Informationsnutzung	Fehlervermeidung
Verbreitung von Informationen Aktualisierung von Informationen	Informationsbeschaffung	keine Verwendung veralteter Informationen

13222

Abbildung 22: Potenziale durch Aktualität und Verfügbarkeit der Informationen

Kontextbewusstheit der Informationsanwendung

Die dynamische Darstellung auf Displays anstelle eines statischen Ausdrucks auf Papier ermöglicht es, die Informationen der jeweiligen Situation anzupassen. Der Mitarbeiter sieht ausschließlich die Informationen, die er für den aktuell auszuführenden Arbeitsschritt benötigt. Zugriff auf weitere Informationen, die bspw. in Dokumenten vorliegen, kann der Mitarbeiter kontextbezogen auswählen. Der Fokus der Darstellung lässt sich auf die relevanten Informationen lenken. Nicht benötigte Informationen bleiben verborgen, sodass der Mitarbeiter eine geringere kognitive Leistung dafür aufbringen muss, aktuell nicht relevante Information auszublenden. Zudem lässt sich der Detailgrad der Informationen von einem Überblick über das Produkt oder zu erfüllende Aufgaben bis hin zu detaillierten Informationen zu einem Bauteil wählen. Abbildung 23 fasst die Potenziale zusammen, die sich aus der Kontextbewusstheit der Anwendung ergeben.

Informationserstellung	Informationsnutzung	Fehlervermeidung
-	Informationssuche Informationserfassung	weniger übersehene Informationen

13223

Abbildung 23: Potenziale durch Kontextbewusstheit der Informationsanwendung

Dynamische, interaktive Darstellung

Die dynamische Darstellung auf einem Display ermöglicht es, Inhalte in einer intuitiveren Form zu vermitteln als auf Papier. Mitarbeiter können bspw. ein CAD-Modell der Arbeitsaufgabe betrachten und damit interagieren, um dreidimensionale Sachverhalte schneller als in einer abstrakten zweidimensionalen Papierzeichnung beurteilen zu können. Die direkte Darstellung der Konstruktionsdaten erspart zudem deren Umwandlung zu technischen Zeichnungen. Die Potenziale einer dynamischen, interaktiven Darstellung sind in Abbildung 24 zusammengefasst.

Informationserstellung	Informationsnutzung	Fehlervermeidung
Umwandlung von Informationen	Informationsinterpretation	weniger missverstandene Informationen

13224

Abbildung 24: Potenziale durch dynamische, interaktive Darstellung

Darstellung in Relation zur realen Umgebung

Mit Augmented Reality lassen sich Informationen in die Fertigungsumgebung bzw. in das Grundwerkstück einblenden. Dies verdeutlicht dem Mitarbeiter den geometrischen Zusammenhang zwischen der Arbeitsaufgabe (dem zu montierenden Teil) und den bereits vorhandenen Bauteilen. Hierdurch entfällt ein kognitiver Schritt – die Übertragung der im virtuellen Modell (z. B. einer Zeichnung oder in CAD) identifizierten Information auf die Realität. Die kognitive Last lässt sich durch den Einsatz von AR reduzieren [Hou13, S. 448]. Die Wahrscheinlichkeit für Verwechslungen des Einbauorts (z. B. wegen einer Rotations-symmetrie des Produkts oder einer gleichförmigen Grundstruktur) sinkt, da das Tracking den Fertigungsmitarbeiter bei der Positionierung und Ausrichtung unterstützt. Ein Soll-Ist-Abgleich im Anschluss an die Montage ermöglicht es dem Mitarbeiter, die von ihm eingebauten Teile mit dem korrekten Geometriemodell zu überblenden, sodass er Fehler und Abweichungen schneller erkennt. Abbildung 25 gibt einen Überblick über die Potenziale von AR.

Informationserstellung	Informationsnutzung	Fehlervermeidung
–	Informationsinterpretation	schnelleres Erkennen von Fehlern

13225

Abbildung 25: Potenziale durch Darstellung in Relation zur realen Umgebung

Automatische Berechnung und Aufbereitung von Informationen

Die Rechenkapazität mobiler Endgeräte genügt, um für den Benutzer auf Basis der vorhandenen Informationen automatisiert neue Informationen zu erzeugen oder solche Informationen geometrisch aufzubereiten, die bspw. nur abstrakt oder in Textform vorliegen. Herkömmliche Fertigungsunterlagen reichert die Arbeitsvorbereitung in der Regel manuell

mit zusätzlichen Informationen wie etwa Bemaßungen oder Warnhinweisen an. Eine automatische Berechnung entlastet somit einerseits die indirekten Bereiche und kann andererseits durch eine geometrische Aufbereitung visuelle Informationen erzeugen, die für die Mitarbeiter der Fertigung verständlicher sind. Potenziale, die aus der permanent verfügbaren Rechenleistung mobiler Endgeräte entstehen, fasst Abbildung 26 zusammen.

Informationserstellung	Informationsnutzung	Fehlervermeidung
Aufbereitung von Informationen	Informationserfassung Informationsinterpretation	weniger übersehene und missverständene Informationen

13226

Abbildung 26: Potenziale durch automatische Berechnung und Aufbereitung von Informationen

Rückmeldung des Einbaustatus

Über die zuvor genannten Potenziale hinaus, die vor allem in einer effizienteren Ausführung der Arbeitsaufgaben liegen, bietet die Informationsbereitstellung mit mobilen Endgeräten die Möglichkeit, wesentlich einfacher präzise Rückmeldedaten aufzunehmen (vgl. Abschnitt 3.2.2), wie den Einbaustatus von Bauteilen, während des Einbaus auftretende Fehler oder Montagezeiten für Bauteile oder Arbeitspakete. Hierdurch ergeben sich weitere generelle Potenziale, die zwar nicht den Arbeitsablauf an sich verbessern, jedoch auf lange Sicht Vorteile bieten. So lassen sich auf der Basis gemessener Ist-Montagezeiten präzisere Schätzungen für die Soll-Zeiten zukünftiger Montageaufgaben abgeben, Kenntnisse über den tagesaktuellen Bauzustand erlauben eine genauere Prognose und eine bessere Planung bis zur Fertigstellung. Die frühzeitige Erkennung und Behebung von Fehlern spart zudem Kosten [Winz15, S. 8].

3.3.2 Technologiespezifische Potenziale

Da alle Geräte unterschiedliche Funktionsweisen und Eigenschaften haben, ergeben sich über die gemeinsamen Potenziale hinaus technologieabhängige Vorteile. Diese können für unterschiedliche Produkte, Fertigungsumgebungen oder benötigte Informationen unterschiedlich nutzbringend sein, wodurch die Wahl je nach Anwendungsfall auf ein bestimmtes Gerät fällt. Die Stärken und Schwächen der Geräte sind im Folgenden aufgeführt – zusammen mit den informationsbezogenen Aktivitäten, sogenannten Schlüsselaktivitäten, bei denen die jeweiligen Geräte die Mitarbeiter unterstützen können, und Schlüsselinformationen, für deren Darstellung sich die jeweiligen Geräte besonders eignen.

Laserprojektoren

Da Projektoren Informationen direkt auf dem Werkstück anzeigen, eignen sie sich besonders, um den Mitarbeitern der Fertigung das Übertragen von Informationen auf das Werkstück – bspw. durch Anzeichnen und Messen – abzunehmen. Schwächen ergeben sich vor allem aus der geringen Portabilität der Geräte, was vor allem bei großen oder wechselnden

Produktionsumgebungen zu Zeitverlusten führen kann. Bei der Wahl des Aufstellungsorts müssen die Mitarbeiter zudem darauf achten, dass sich keine verdeckenden Gegenstände oder Laufwege von Personen zwischen Projektor und Projektionsstelle befinden. Die Darstellung dreidimensionaler Sachverhalte (wie z. B. ein vollständiger Kreuzungsbereich mehrerer Rohre) ist nicht möglich. Abbildung 27 fasst die Potenziale von Laserprojektoren zusammen.

Schlüsselaktivitäten	Schlüsselinformationen	mögliche Probleme
• Messen • Anzeichnen	• Maße • Bauteilpositionen • Bauteilausrichtung	• Transport des Projektors • Ausrichtung des Projektors • mögliche Verdeckung
potenzialstarkes Einsatzgebiet: präzise Markierungen auf Werkstück ohne komplexe Informationen		

13227

Abbildung 27: Technologiespezifische Potenziale von Laserprojektoren

Tablet-Computer

Tablet-Computer sind vielen Mitarbeitern bereits aus privater Anwendung bekannt. Dies ist ein wesentlicher Vorteil für die Einarbeitungszeit, da Bedienelemente wie Touch-Gesten oder die Menüführung bereits vertraut sind. Darüber hinaus sind Tablet-Computer unter den AR-fähigen mobilen Endgeräten die mit Abstand ausgereifteste Lösung. Größe und Auflösung des Displays ermöglichen eine angenehm zu betrachtende Darstellung nahezu aller Informationsarten (bspw. 3D-Modelle, Texte, Bilder, Videos). Hierdurch können sämtliche Wegezeiten zu weiteren Informationsquellen entfallen. Die Portabilität und die Möglichkeit, mit mehreren Personen Informationen auf dem Gerät zu betrachten, können die Kommunikation über die Arbeitsinhalte vereinfachen. Dies kommt vor allem dann zum Tragen, wenn mehrere Fertigungsmitarbeiter gemeinsam eine Aufgabe bearbeiten. Die einfache Interaktion mit dem Gerät lässt den Anwender Informationen schnell aufrufen und ggf. eine individuelle Ansicht (bspw. Detailgrad oder Zoomstufe) auswählen, die die Information für ihn verständlich darstellt. Die einfache Interaktion kann dabei allerdings dazu einladen, mit der Bedienung des Informationsmediums mehr Zeit zu verbringen als notwendig. Einen Überblick über die Potenziale gibt Abbildung 28.

Schlüsselaktivitäten	Schlüsselinformationen	mögliche Probleme
• Informationsmedium betrachten • Werkstück betrachten • Kommunikation • Dokumentation	• komplexe 3D-Geometrien • Maße • Dokumente	• übermäßige Interaktion
potenzialstarkes Einsatzgebiet: Vielzahl unterschiedlicher, komplexer Informationen, die Interaktion oder Dokumentation erfordern und deren Abfolge nicht vordefiniert ist		

13228

Abbildung 28: Technologiespezifische Potenziale von Tablet-Computern

Head-mounted Displays

Wesentlicher Vorteil von HMDs ist die permanente Anzeige von Informationen bei gleichzeitiger Händefreiheit, da der Benutzer das Gerät in der Regel wie eine Brille auf dem Kopf trägt. Dadurch entfallen Zeiten, um das Informationsmedium zu greifen und es abzulegen. Entsprechend spielen HMDs ihre Vorteile vor allem bei schnellen Abfolgen von Informationsprimitiven aus – einfachen Informationen, die genügen, um dem Nutzer den jeweils nächsten Schritt zu verdeutlichen, bspw. ein einzelnes Maß, ein Arbeitsschritt oder der Lagerort eines Bauteils. Die Informationen müssen hierfür allerdings hinreichend gut aufbereitet sein. Schwächen ergeben sich bei der Bedienung, sofern komplexe oder kontinuierliche Eingaben (bspw. Texteingabe oder Gesten zum Ausrichten eines 3D-Modells) erforderlich sind. Zudem erschweren derzeit noch der technische Stand (tatsächlich überblendetes Sichtfeld, Akkulaufzeit) und ergonomische Unausgereiftheit (Gewicht, Betrachtungskomfort, Einschränkung des Sichtfelds) einen dauerhaften Einsatz. Der Vorteil der Mobilität bei gleichzeitiger Einblendung von Informationen und Händefreiheit kommt derzeit nur in wenigen Anwendungsszenarien zum Tragen, darunter bspw. Pick-by-Vision oder Wartungsunterstützung im Außendienst. Die Potenziale sind im Überblick in Abbildung 29 dargestellt.

Schlüsselaktivitäten	Schlüsselinformationen	mögliche Probleme
- Informationsmedium betrachten - Werkstück betrachten	3D-Geometrien - Maße	- Ergonomie bei Dauereinsatz - Bedienung - technische Unausgereiftheit: überblendeter Bereich, Auflösung
potenzialstarkes Einsatzgebiet:	Vielzahl sequenzieller Informationsprimitive bei gleichzeitiger Verwendung der Hände und unbedingt erforderlicher Mobilität	

13229

Abbildung 29: Technologiespezifische Potenziale von Head-mounted-Displays

3.3.3 Technologieauswahl

Um für einen konkreten Anwendungsfall die richtige Technologie, i. e. das Gerät, das die größte Produktivitätsverbesserung und Fehlerminimierung verspricht, auszuwählen, sind zwei Grundlagen erforderlich:

- Kenntnisse über die Fertigungs- und Randbedingungen des Einsatzes:
Hierüber erfolgt eine Eingrenzung der grundlegend geeigneten Geräte. Solche Geräte, die sich aufgrund der Randbedingungen nicht im gewählten Szenario behaupten können, scheiden an diesem Punkt als Lösung aus.
- Die Häufigkeitsverteilung der Mitarbeiterzustände:
Diese dient als Ausgangslage, um die Produktivitätsvorteile der unterschiedlichen Geräte für das gewählte Szenario abzuschätzen.

Ein Verfahren zur Eingrenzung der geeigneten Hardware anhand von Kriterien wie der Umgebung, den darzustellenden Informationen und der erforderlichen Mobilität besteht bereits [Hala14a, S. 25ff.]. Das Auswahlverfahren eignet sich, um die Tauglichkeit von Geräten für die Informationsversorgung zu bewerten, jedoch bleiben die Produktivitätspotenziale des Anwendungsfalls unberücksichtigt, i. e. der Einsatz eines Geräts, das als geeignet aus dem Auswahlprozess hervorgeht, führt nicht zwangsläufig zu den gewünschten Produktivitätssteigerungen.

Um die Zweckhaftigkeit des Einsatzes sicherzustellen, muss darüber hinaus ein Abgleich zwischen den Mitarbeiterzuständen im Anwendungsfall und den gerätespezifischen Potenzialen stattfinden. Bspw. kann eine Analyse der Mitarbeiterzustände ergeben, dass die Zustände Messen und Anzeichnen nicht häufig genug auftreten, um den Einsatz eines prinzipiell geeigneten Laserprojektors zu rechtfertigen. Umgekehrt genügt ein Abgleich zwischen Mitarbeiterzuständen und gerätespezifischen Potenzialen nicht, da hierbei die Randbedingungen des Einsatzes (z. B. dass die Mitarbeiter durchgehend beide Hände für die Montagetätigkeit benötigen) unberücksichtigt bleiben.

Produktivität

Eine einfache Möglichkeit, das für die Produktivität potenzialträchtigste Gerät auszuwählen, besteht darin, die aus einer Multimomentaufnahme nach Tietze [Tiet17, S. 62ff.] hervorgegangenen Mitarbeiterzustände den gerätespezifischen Schlüsselaktivitäten gegenüberzustellen und die für die jeweiligen Geräte zugänglichen Potenziale zu vergleichen. Abbildung 30 zeigt dieses Vorgehen für eine exemplarische Zustandsverteilung.

Verteilung der Aktivitäten		AR-Gerät		
Aktivität	Anteil	Tablet	HMD	Projektor
Werkstück betrachten	6 %	☒ 6 %	☒ 6 %	
Informationsmedium betrachten	5 %	☒ 5 %	☒ 5 %	
mit Mitarbeiter sprechen	16 %	☒ 16 %		
Werkstück messen	3 %			☒ 3 %
Werkstück ausrichten	7 %			☒ 7 %
Werkstück anzeichnen	1 %			☒ 1 %
Informationsmedium schreiben	0 %	☒ 0 %		
Summe	38 %	27 %	11 %	11 %

☒ = Schlüsselaktivität des jeweiligen Geräts

13230

Abbildung 30: Gegenüberstellung einer exemplarischen Zustandsverteilung und den gerätespezifischen Schlüsselaktivitäten

Es ist zu beachten, dass dieses Verfahren nur die theoretisch zugänglichen Potenziale vergleicht. Für eine detailliertere Betrachtung sind weitere quantitative Annahmen über die umsetzbaren Potenziale notwendig. Der Anteil des Zustands *mit Mitarbeiter sprechen* ließe sich bspw. nur dann mittels einer verbesserten Informationsversorgung verringern, wenn es sich nicht ausschließlich um private Gespräche handelt. Zudem ist zu präzisieren, um welchen Anteil die Geräte die Mitarbeiterzustände zu senken in der Lage sind. Diese Annahmen lassen sich entweder mit aufwändigen Analysen treffen oder unter Inkaufnahme eines Fehlers abschätzen und können direkt in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen.

Qualität

Um feststellen zu können, welches Gerät sich am besten dazu eignet, die Fehleranzahl zu senken und damit die Qualität zu erhöhen, sind die folgenden Fragestellungen zu beantworten:

- Welche Fehler treten mit welcher Häufigkeit auf?
- Welche Information liegt den Fehlern jeweils zugrunde?
- Welches Gerät kann diese Information besser anzeigen?

Analog zur Bewertung der Produktivität kann dies anhand einer Fehlerauswertung und den daraus identifizierten Fehlerquellen erfolgen (vgl. Abschnitt 3.1.4). Die zuvor skizzierten gerätespezifischen Schlüsselinformationen lassen sich nun den Fehlerquellen gegenüberstellen, sodass sich für jedes Gerät das Potenzial zur Fehlervermeidung ergibt. Abbildung 31 zeigt das Vorgehen an einem fiktiven Beispiel.

Fehlerauswertung			AR-Gerät		
Aktivität	Information	Anteil	Tablet	HMD	Projektor
Halter fehlt	Richtlinie	10 %	☒ 10 %		
falsche Höhe	Maß	6 %	☒ 6 %	☒ 6 %	☒ 6 %
Schweißfehler	Richtlinie	5 %	☒ 5 %		
Abstand nicht eingehalten	Endzustand	5 %	☒ 5 %	☒ 5 %	
falsche Position	Maß	5 %	☒ 5 %	☒ 5 %	☒ 5 %
falsche Ausrichtung	3D-Geometrie	4 %	☒ 4 %	☒ 4 %	4 %
Summe		35 %	35 %	20 %	15 %

☒ = Schlüsselinformation des jeweiligen Geräts

13231

Abbildung 31: Gegenüberstellung einer exemplarischen Fehlerauswertung und den gerätespezifischen Schlüsselinformationen

Wie auch für die Produktivitätsbewertung gibt die Tabelle nur einen groben Anhaltspunkt, mit welchen Geräten sich welche Potenziale theoretisch erschließen lassen. Für eine detailliertere Einschätzung ist zu berücksichtigen, wie groß der Anteil der tatsächlich vermeidbaren Fehler ist. Wie bei den Produktivitätspotenzialen geschieht dies entweder über detaillierte Aufnahmen oder Annahmen. Die Ergebnisse lassen sich für eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung verwenden.

3.4 Anforderungen an die AR-gestützte Informationsversorgung

Aus den in Abschnitt 3.2 dargestellten Defiziten der Informationsversorgung leitet dieser Abschnitt Anforderungen an eine Augmented-Reality-gestützte Lösung zur Informationsversorgung ab. Die Anforderungen teilen sich in drei Bereiche auf:

1. Anforderungen zur Verbesserung der Informationsbereitstellung (V)
2. Anforderungen zur produktiven Nutzung digitaler Arbeitsunterlagen (P)
3. Anforderungen zur Akzeptanz (A)

3.4.1 Verbesserung der Informationsversorgung

Um Kosten und Zeit für die Fertigung von Unikaten zu senken und die Qualität zu erhöhen, sollen Augmented-Reality-fähige Geräte den Mitarbeitern Informationen bereitstellen. Dazu müssen die richtigen Fertigungsinformationen zur richtigen Zeit auf dem richtigen mobilen Endgerät verfügbar sein. Hierbei ist zu beachten, dass die Lösung die zuvor festgestellten Defizite der papierbasierten Informationsversorgung behebt. Im Detail ergeben sich hieraus die folgenden vier Anforderungen, die jeweils eine Phase des Informationsprozesses verbessern:

Anforderung V1: Vermeidung von Informationsbeschaffung

Um Informationsbeschaffung zu vermeiden, sind eine hohe Verfügbarkeit und die Aktualität der Informationen zu gewährleisten. Alle Informationen, die ein Mitarbeiter der Fertigung für die korrekte Ausführung seiner Arbeitsaufgabe benötigt, müssen auf einem mobilen Endgerät verfügbar sein, das er mit sich führt. Um zu verhindern, dass die Mitarbeiter veraltete Fertigungsinformationen beziehen, müssen die Daten auf den Geräten zu dem Zeitpunkt, zu dem der Mitarbeiter sie abrufen, dem aktuellen Konstruktions- und Planungsstand entsprechen. Hierbei ist zwischen dem Aufwand für den Abruf sekundenaktueller Informationen und dem maximal akzeptablen Alter der Informationen abzuwägen. Der Aufruf der Informationen soll unabhängig vom Aufenthaltsort des Mitarbeiters innerhalb des Unternehmens möglich sein.

Anforderung V2: Verkürzung der Informationssuche

Um die Zeit für die Informationssuche zu verkürzen, muss der Mitarbeiter die Informationen in seinem aktuellen Kontext schnell finden können. Hierzu sind die Arbeitsinhalte mit den jeweils benötigten Informationen zu verknüpfen. Die Anwendung soll den Mitarbeiter beim Aufruf der für ihn relevanten Informationen unterstützen, indem sie bereits vorliegende Kontextdaten nutzt (bspw. vorliegendes Arbeitspaket, aktueller Arbeitsschritt, vorangegangene Arbeiten).

Anforderung V3: Beschleunigung der Informationserfassung

Eine Reduktion der Zeit für die Informationserfassung tritt ein, wenn der Mitarbeiter die benötigten Informationen möglichst schnell erfassen kann – idealerweise auf einen Blick. Hierzu ist es insbesondere notwendig, den Umfang der gleichzeitig angezeigten Informationen einzuschränken. Die Anwendung muss entweder aus dem Kontext des Arbeitsschritts heraus entscheiden, welche Informationen für den Mitarbeiter relevant sind, oder dem Mitarbeiter die Möglichkeit geben, den Informationsumfang selbst zu steuern.

Anforderung V4: Vereinfachung der Informationsinterpretation

Um die Zeit für die Informationsinterpretation zu senken, muss die Darstellung der Informationen möglichst verständlich sein. Hierzu soll die digitale Arbeitsunterlage dem Mitarbeiter die Informationen in einer intuitiven und übersichtlichen Form präsentieren. Die notwendige Übertragungsleistung, um die angezeigte Information in der Realität anwenden zu können, soll möglichst gering sein. Abstrakte Darstellungen, bei denen Informationen verloren gehen, wie bspw. ins Zweidimensionale projizierte 3D-Modelle, sind zu vermeiden. Informationen, die nur in einer abstrakten Form vorliegen, wie etwa Abstände zwischen Bauteilen, Richtlinien oder Fließrichtungen, sind für die Mitarbeiter so aufzubereiten, dass sie sich auf einen Blick erfassen und verstehen lassen. Ebenso muss die digitale Arbeitsunterlage diese Informationen so anzeigen, dass ihr geometrischer Zusammenhang sofort ersichtlich ist.

3.4.2 Produktive Nutzung digitaler Arbeitsunterlagen

Bei der Verwendung einer neuen Lösung zur Informationsversorgung entstehen Herausforderungen durch veränderte Prozesse. Es ist darauf zu achten, dass die Innovation sowohl in den indirekten als auch in den direkten Bereichen ein produktives Arbeiten bei der Informationserstellung bzw. der Informationsnutzung ermöglicht. Im Detail ergeben sich die folgenden Anforderungen:

Anforderung P1: geringer Vorbereitungsaufwand

Die in Abschnitt 3.4.1 aufgestellten Anforderungen zur Verbesserung der Informationsversorgung können dazu führen, dass der Aufwand für Erstellung und Bereitstellung der

Informationen durch die indirekten Bereiche steigt. Da sich in diesem Fall der Aufwand auf Mitarbeiter mit einem tendenziell höheren Stundenlohn verlagert, wäre dies meist unwirtschaftlich. Das Konzept soll auch den Vorbereitungsaufwand senken.

Anforderung P2: geringer Nutzungsaufwand

Im Gegensatz zum bisher verwendeten statischen Informationsmedium Papier bieten mobile Endgeräte Interaktionsmöglichkeiten. Man kann die Zeit, in der Mitarbeiter das Gerät verwenden, einteilen in die Zeit für die Interaktion zum Aufrufen der Informationen, Wartezeiten, in denen die Anwendung Informationen lädt, und die Zeit für das Ablesen der Informationen. Die Anwendung lässt sich nur dann produktiv nutzen, wenn Wartezeiten möglichst gering ausfallen, und eine zügige, intuitive Bedienung möglich ist.

3.4.3 Akzeptanz

Vor allem informationstechnologische Innovationen erfordern bei ihrer Einführung die Akzeptanz aller Prozessbeteiligten, insbesondere die der Nutzer und die der Entscheidungsträger. Um diese zu gewährleisten, decken die Anforderungen zur Akzeptanz die kritischen Punkte ab, die Hemmnisse bei der Einführung der Innovation darstellen können. Im Detail ergeben sich die folgenden Anforderungen:

Anforderung A1: hohe Benutzerfreundlichkeit

Damit die Nutzer – die Mitarbeiter der Fertigung – die digitalen Arbeitsunterlagen als Alternative zu den bisher verwendeten Papierzeichnungen akzeptieren, müssen sie einfach zu bedienen sein. Die Anwendung soll daher den in der ISO-Norm 9241 festgehaltenen Richtlinien zur Benutzerfreundlichkeit entsprechen. Diese setzen sich aus Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung zusammen. Die Anforderungen zur verbesserten Informationsversorgung bzw. zum geringen Nutzungsaufwand decken die ersten beiden Kriterien bereits ab. Ausschlaggebend für die Zufriedenstellung des Benutzers ist Teil 110 der ISO-Norm, der Grundsätze zur Dialoggestaltung vorgibt und nach denen sich die Bedienung der Anwendung richten soll.

Anforderung A2: hohe Einsatztauglichkeit im Prozess

Die entworfene Lösung muss sich in den Arbeitsprozess integrieren lassen. Hierbei spielt vor allem die eingesetzte Hardware eine Rolle. Diese muss einerseits so robust ausgelegt sein, dass sie den Industriebedingungen standhält und andererseits so leicht und portabel, dass die Mitarbeiter sie ergonomisch verwenden können. Ebenso ist eine ausreichende Betriebszeit der Geräte erforderlich, damit Mitarbeiter keine Pausen einlegen müssen, um bspw. den Akku des Geräts zu laden. Weitere Rahmenbedingungen wie etwa die Verwendung von Arbeitshandschuhen sind zu beachten.

Anforderung A3: hohe Sicherheit

Der Einsatz digitaler Arbeitsunterlagen darf sich auf die Sicherheit der Produktionsdaten oder personenbezogener Daten nicht negativ auswirken. Damit sich geistiges Eigentum des Unternehmens nicht ungewollt verbreitet, dürfen sich die Geräte nicht von Dritten auslesen lassen. Ebenso darf die Anwendung keine personenbezogenen Daten erfassen, die sich zur Bewertung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit einzelner Mitarbeiter eignen.

4 Konzept für eine digitale Arbeitsunterlage

Das vorliegende Kapitel stellt ein Konzept zur Informationsversorgung in der Unikatproduktion mit einer Augmented-Reality-gestützten Anwendung auf mobilen Endgeräten vor. Es beginnt mit einem Überblick über den Aufbau des Konzepts und beschreibt anschließend dessen Teilaspekte.

4.1 Überblick über das Konzept

Das System zur Bereitstellung von Fertigungsinformationen auf mobilen Endgeräten ist in zwei Hauptbestandteile gegliedert (Abbildung 32):

- Eine mobile Anwendung zeigt den Mitarbeitern der Fertigung die Informationen an (Abschnitte 4.2 bis 4.5).
- Ein zentraler Datenserver stellt Informationen bereit, die er bedarfsgerecht auf die mobilen Endgeräte übermittelt (Abschnitt 4.6). Mitarbeiter der Planungsabteilungen füllen den Server mit Fertigungsdaten.

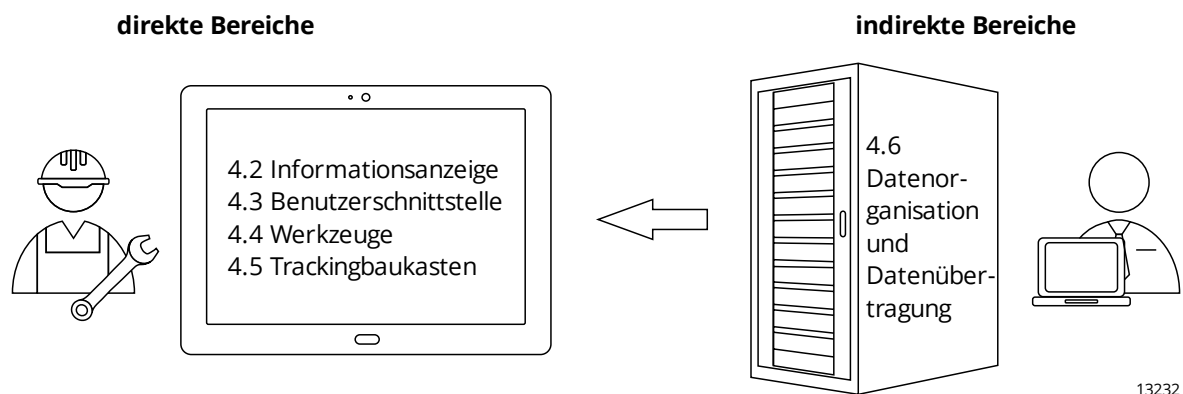


Abbildung 32: Übersicht über den Aufbau des Systems mit mobilem Endgerät (links) und Distributionsserver (rechts)

Zusammen setzen die Systembestandteile die Anforderungen an die verbesserte Informationsversorgung um. Während der Server die Datenverfügbarkeit und -aktualität gewährleistet, um Informationsbeschaffung zu vermeiden (Anforderung V1), ist die mobile Anwendung für einen möglichst einfachen Zugriff auf kontextrelevante Fertigungsinformationen und eine intuitive, situationsbezogene Anzeige konzipiert, sodass sie die Informationssuche, -erfassung und -interpretation unterstützt (Anforderungen V2 bis V4).

4.1.1 Mobile Anwendung

Um die Zeit für Informationsbeschaffung zu vermeiden, benötigen die Mitarbeiter der Fertigung ein tragbares Medium, das in der Lage ist, sämtliche potenziell relevanten Informa-

tionen darzustellen. Hierzu eignen sich aufgrund ihrer kompakten Bauform vor allem mobile Endgeräte wie Tablet-Computer oder Smartphones (vgl. Abschnitt 3.3.3). Das erarbeitete Konzept für eine digitale Arbeitsunterlage ist in dieser Arbeit am Beispiel von Tablet-Computern dargestellt und umgesetzt, da diese für die Anwendungsbeispiele das größte Potenzial versprechen. Es lässt sich aber ebenso auf andere AR-fähige Geräte übertragen. Die Informationsversorgung für die Mitarbeiter der Fertigung ist auf den Endgeräten in einer Anwendung realisiert, deren Aufbau schematisch in Abbildung 33 dargestellt ist.

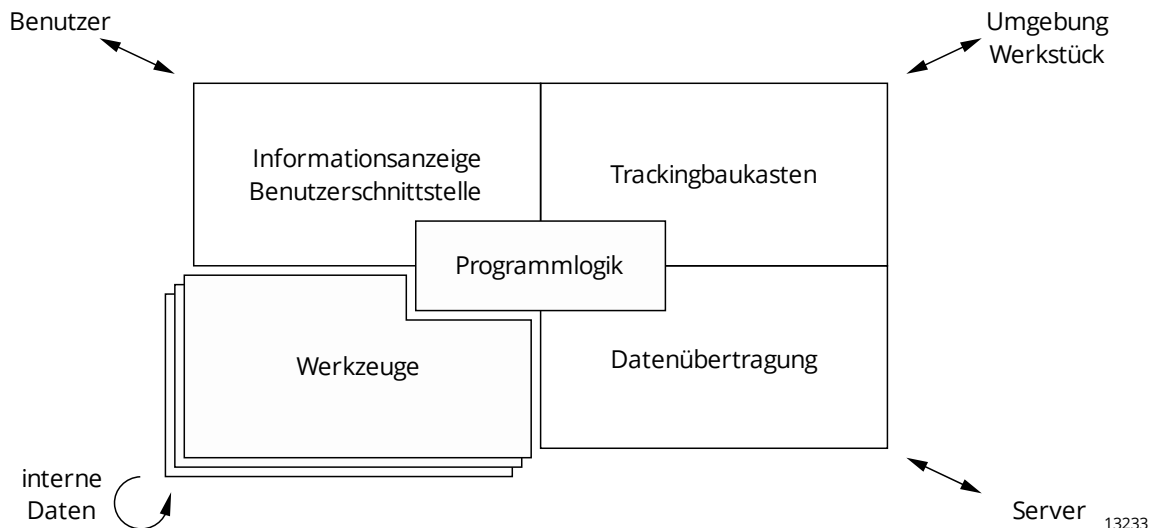


Abbildung 33: Aufbau der mobilen Anwendung

Die einzelnen Komponenten der Anwendung erfüllen die folgenden Aufgaben:

- Die *Programmlogik* steuert den Ablauf des Programms, die arbeitsschrittgerechte Anzeige der Fertigungsinformationen sowie die Reaktion der Anwendung auf Ereignisse wie Benutzereingaben.
- Die *Informationsanzeige* (Abschnitt 4.2) blendet dem Benutzer Informationen bedarfsgerecht ein. Über die *Benutzerschnittstelle* (Abschnitt 4.3) kann er mit der Anwendung interagieren und die benötigten Informationen auswählen.
- Optional einsetzbare *Werkzeuge* (Abschnitt 4.4) erweitern die Grundfunktionalität, um den Umgang mit der Anwendung möglichst produktiv zu gestalten. Sie bereiten die vorhandenen Fertigungsinformationen automatisiert so auf, dass die Mitarbeiter sie schneller verstehen können (bspw. durch das Einblenden automatisch erzeugter Bemaßung), oder dass Teile des Vorbereitungsaufwands in den vorgelagerten Bereichen entfallen (bspw. durch eine automatische Reihenfolgeplanung).
- Der *Trackingbaukasten* (Abschnitt 4.5) enthält unterschiedliche Trackingverfahren zum Bestimmen der Pose des Geräts in Relation zum Werkstück, um die Informationen geometrisch korrekt in das Umgebungsbild einblenden zu können.
- Die *Datenschnittstelle* (Abschnitt 4.6) kommuniziert mit dem zentralen Server. Die Anwendung empfängt hierüber die Fertigungsdaten, lädt die Daten in den Speicher und schickt Rückmeldedaten an den Server.

4.1.2 Zentraler Server

Um die Informationsbeschaffung zu vermeiden (Anforderung V1), müssen sich die richtigen Fertigungsinformationen zur richtigen Zeit auf dem richtigen mobilen Endgerät befinden. Da Konstruktion, Planung und Produktion von Unikaten in der Regel parallel zueinander stattfinden, genügt es nicht, die Fertigungsinformationen einmalig (vor Fertigungsbeginn) auf das Gerät zu übertragen, diese sind vielmehr täglich zu aktualisieren. Zusätzlich müssen die Rückmeldedaten in die indirekten Bereiche zurückfließen.

Der Datenaustausch ließe sich zwar manuell durchführen, bspw. indem Mitarbeiter der Arbeitsplanung die Fertigungsdaten direkt auf ein Endgerät übertragen und die Rückmeldedaten von dort herunterladen. Alternativ könnten die Mitarbeiter der Fertigung die Daten zu Schichtbeginn bspw. von einem Netzlaufwerk auf das Gerät herunterladen und nach Schichtende die Rückmeldedaten hochladen.

In beiden Fällen verursacht dies jedoch einen Arbeitsaufwand, der einer produktiven Nutzung entgegensteht (Anforderungen P1 bzw. P2). Im ersten Fall muss bereits in der Planungsabteilung die Zuordnung zwischen Fertigungsdatensatz, ausführendem Fertigungsmitarbeiter und Gerät bekannt sein, was außerhalb ihres Aufgabenbereichs liegt. Im zweiten Fall müsste der Zugriff auf alle Fertigungsinformationen weitestgehend unbeschränkt sein, was die Datensicherheit gefährdet (Anforderung A3).

Um die Fertigungsdaten möglichst aufwandsarm und automatisiert auf die mobilen Endgeräte zu verteilen, übernimmt ein zentraler Server die Datenübertragung. Auf diesem befinden sich eine Datenbank, die alle aktuellen Fertigungsdaten enthält, und eine Schnittstelle, über die die mobilen Endgeräte Fertigungsdaten abrufen können. Eine drahtlose Verbindung mit einer auf die örtlichen Gegebenheiten und Anforderungen angepassten Reichweite (i. d. R. WLAN IEEE 802.11) eignet sich dazu, Daten möglichst flexibel und unabhängig vom Aufenthaltsort der Mitarbeiter auf die Geräte zu übertragen. Ebenfalls lassen sich geänderte Daten über eine drahtlose Verbindung schneller aktualisieren, sofern sich das mobile Endgerät in deren Reichweite befindet.

Die Planungsabteilung versorgt die Datenbank des Servers mit Arbeitsinhalten. Mitarbeitern der Fertigung bietet der Server nur die Arbeitspakete an, die sie ausführen dürfen und zu Schichtbeginn herunterladen. Die Datenübertragung in die Software-Anwendung auf dem mobilen Endgerät findet dabei über eine verschlüsselte Verbindung statt, sodass die Datensicherheit gewährleistet ist. Rückmeldedaten überträgt das mobile Endgerät automatisch an den Server, der diese in der Datenbank aktualisiert.

4.1.3 Grundvoraussetzungen für den Einsatz

Mehrere Voraussetzungen müssen erfüllt sein, um das Konzept im Unternehmen anwenden und digitale, AR-gestützte Arbeitsunterlagen einführen zu können:

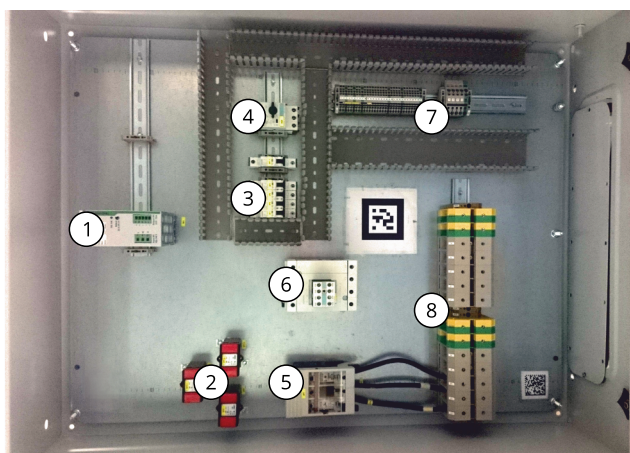
1. CAD-Modelle: Die Produktdaten müssen, zumindest zum Großteil, als 3D-CAD-Modell vorliegen, damit sie sich auf den mobilen Endgeräten anzeigen lassen.
2. Zusatzinformationen: Falls vorhanden, müssen sich weitere Informationen (bspw. Dokumente) den jeweiligen Bauteilen oder Arbeitsschritten eindeutig zuordnen lassen.
3. Arbeitspakete: Sofern mehrere Mitarbeiter(-gruppen) unterschiedliche Montageinhalte am zu fertigenden Produkt bearbeiten, müssen die Bauteile entsprechend der Montageinhalte zu Arbeitspaketen zusammengefasst sein. Hierzu ist eine eindeutige Zuordnung der Bauteile zu einem Arbeitspaket notwendig.
4. Tracking: Um die Informationen mit AR anzeigen zu können, müssen für das Tracking die Arbeitsumgebung oder künstliche Positionsmarken in der Arbeitsumgebung vermessen sein.
5. Arbeitsplan (optional): Ist eine vorgegebene Reihenfolge der Arbeitsschritte erforderlich, muss eine eindeutige Zuordnung (bspw. über Bauteilbezeichner oder Dateinamen) von Modelldaten zum jeweiligen Arbeitsschritt existieren.

4.1.4 Anwendungsbeispiele

Zwei Anwendungsbeispiele aus der Unikatproduktion – der der Schaltschrankmontage und dem Schiffbau – begleiten die Darstellung des Konzepts und verdeutlichen es anhand von Problemstellungen aus der Praxis. Die Anwendungsbeispiele dienen abschließend auch der Evaluation des Konzepts.

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage

Das Unternehmen stellt elektronische Steuerungen für Anlagen her, die in einem Schaltschrank angeordnet sind. Aufgrund individueller Kundenwünsche haben die Schaltschränke Unikatcharakter. In der Schaltschrankverdrahtung verbinden die Mitarbeiter die elektronischen Komponenten mit vorgefertigten Drähten miteinander. Für die Informationsversorgung verwenden sie einen Schaltplan, der eine Vielzahl von Seiten umfasst. Abbildung 34 zeigt ein Beispiel für den Aufbau eines Schaltschranks.



- ① Ladegerät
- ② Stromwandler
- ③ Sicherungen
- ④ Motorschutzschalter
- ⑤ Sicherungslasttrenner
- ⑥ Schalterschütz
- ⑦ Reihenklempen Steuerung
- ⑧ Reihenklempen Last

13234

Abbildung 34: Aufbau eines exemplarischen Schaltschranks

Anwendungsbeispiel Schiffbau

Das Schiffbauunternehmen montiert in einer getakteten Fertigung Ausrüstungsbauteile – bspw. Rohre und Kabelkanäle – auf sogenannten Sektionen, aus denen sich später das Schiff zusammensetzt. Da das Schiff ein Unikat ist, haben auch die einzelnen Sektionen Unikatcharakter. Die Mitarbeiter erhalten für einen Sektionsbereich, der bis zu 300 m² umfasst, eine großformatige Übersichtszeichnung, aus der sie einen Großteil der Informationen entnehmen, um die Sektionen mit bis zu ca. 2.000 z. T. bereits vorgefertigten Bauteilen auszurüsten. Abbildung 35 zeigt ein Beispiel für die Ausrüstung von Schiffssektionen.



Abbildung 35: Teil einer Schiffssektion nach der Ausrüstung

4.2 Informationsanzeige

Der vorliegende Abschnitt leitet her, wie sich die Fertigungsinformationen so darstellen lassen, dass die Aufwände für die Informationssuche, -erfassung und -interpretation sinken. Das Konzept umfasst eine Systematik, die Empfehlungen für die Auswahl der darzustellenden Informationen und deren jeweilige Darstellungsform abgibt.

Um die Mitarbeiter effizient mit Fertigungsinformationen versorgen zu können, muss die digitale Arbeitsunterlage drei wesentliche Anforderungen erfüllen. Sie muss

- die Informationssuche verkürzen (Anforderung V2),
- die Informationserfassung beschleunigen (Anforderung V3) und
- die Informationsinterpretation vereinfachen (Anforderung V4).

Diese drei Teilaspekte sind in den folgenden Abschnitten erläutert. Gleichzeitig ergibt sich aus den Anforderungen, dass sich die darzustellenden Informationen zwischen Unternehmen, Unternehmensbereichen und in manchen Fällen sogar zwischen einzelnen Mitarbeitern mit unterschiedlichem Kenntnisstand erheblich unterscheiden können. Der Einführung eines nutzbringenden AR-Systems muss also grundsätzlich eine Analyse der anzuzeigenden Informationen (vgl. Abschnitt 3.1) vorausgehen.

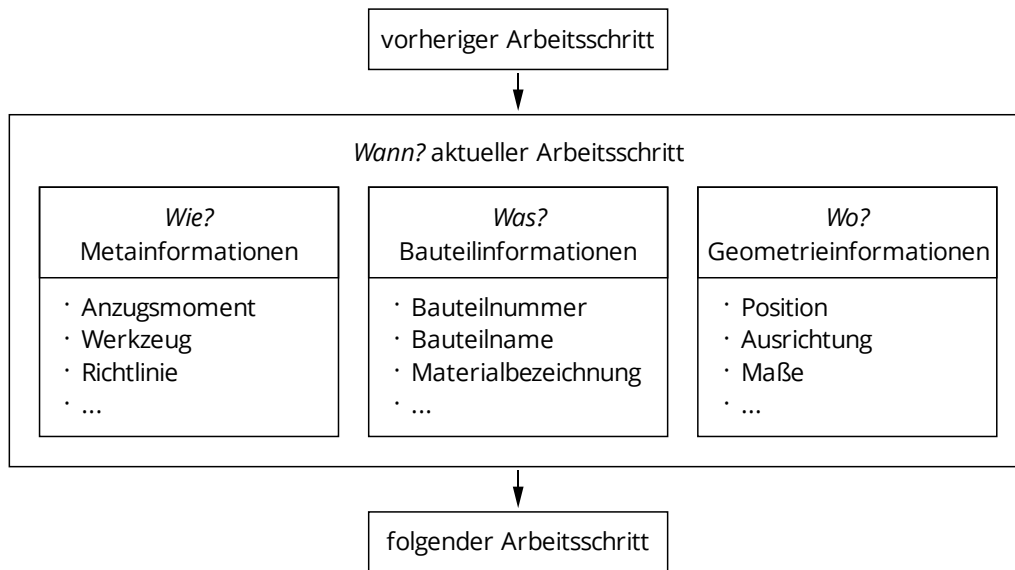
4.2.1 Verknüpfung und Darstellung der Informationen

Mithilfe der Fertigungsinformationen möchte ein Mitarbeiter die Frage klären, *wann er was wo und wie* montieren soll. Daraus ergeben sich vier einzelne Fragestellungen, die eine Information für den Mitarbeiter beantworten kann:

- *Wann?* (In welchem Arbeitsschritt ist etwas zu montieren?)
- *Was?* (Welches Bauteil ist zu montieren?)
- *Wo?* (An welcher Position, in welcher Ausrichtung ist es zu montieren?)
- *Wie?* (Welche Randbedingungen sind zu beachten?)

Die Fragestellungen sind im Folgenden als Zweck der Information bezeichnet. Informationen können je nach Anwendungsfall unterschiedliche Zwecke erfüllen. Betrachtet man die Beziehungen, die zwischen den Informationszwecken bestehen, ergibt sich folgendes Bild (siehe Abbildung 36):

- Es besteht ein temporaler Zusammenhang zwischen den einzelnen Arbeitsschritten (*Wann?*).
- Es besteht ein lokaler Zusammenhang zwischen dem Arbeitsschrittinhalt (*Was?*) und den geometrischen Informationen (*Wo?*).
- Es besteht ein modaler Zusammenhang zwischen dem Arbeitsschrittinhalt und den Randbedingungen, die den Vorgang beschreiben (*Wie?*).



13236

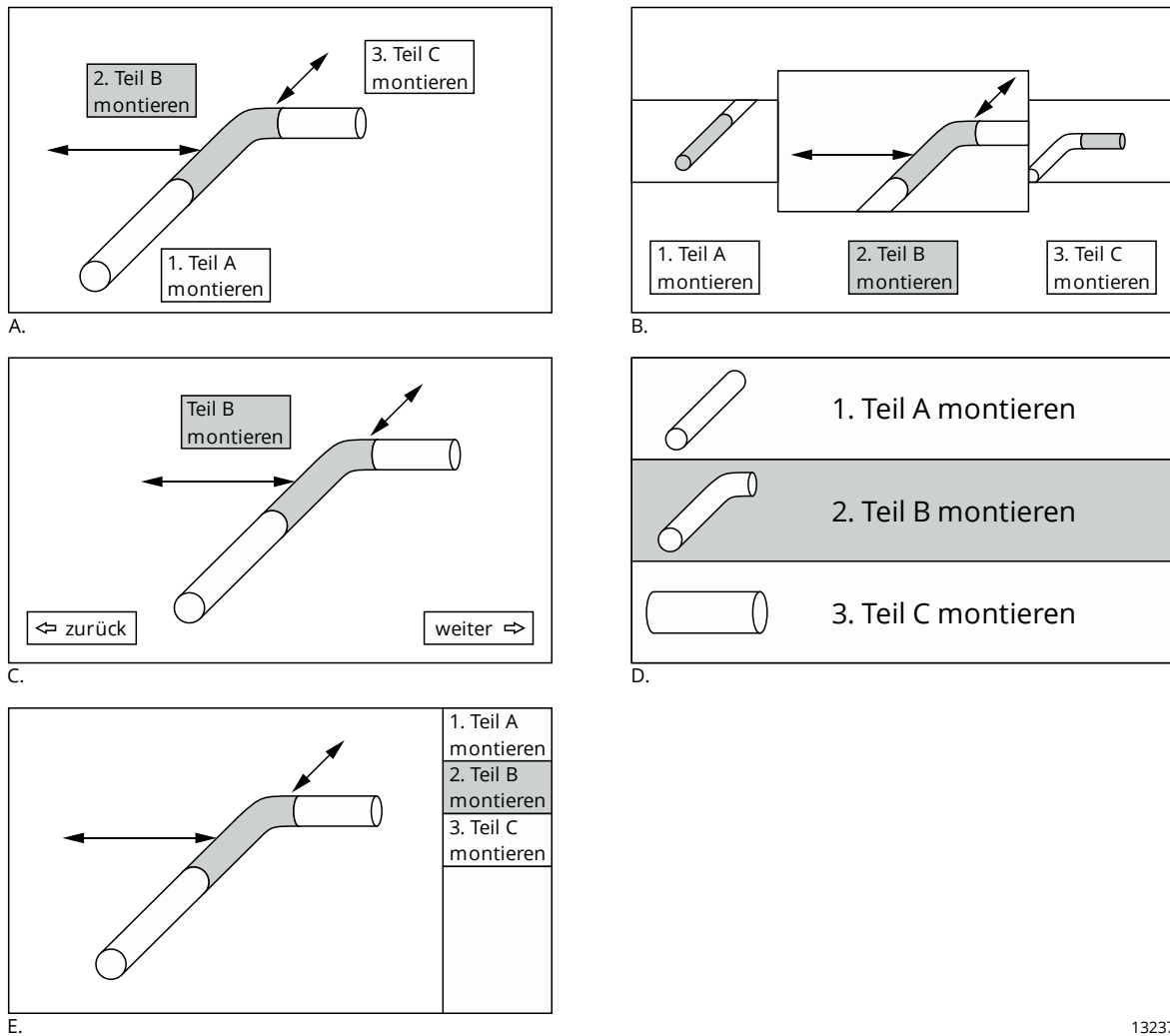
Abbildung 36: Informationszwecke und deren Zusammenhänge

Studien zeigen, dass die kognitive Belastung beim Verstehen einer Aufgabe steigt, wenn Informationen voneinander getrennt dargestellt sind, die sich aufeinander beziehen [Chan91, S. 297-303]. Dies ist etwa bei Bauteillisten, einer separaten Zeichnung und einem weiteren Dokument mit Einbauhinweisen der Fall. Hierdurch verwendet der Mitarbeiter zusätzliche Zeit dafür, zusammengehörige Informationen zu identifizieren und sie zu verknüpfen – der sogenannte Split-Attention-Effect tritt auf [Chan92, S. 234].

Diese Zeit lässt sich bei einer geschickten Anordnung einsparen, die zusammengehörige Informationen verknüpft. Hieraus entsteht die Fragestellung, wie die oben dargestellte Informationsstruktur, die lokale, temporale und modale Bezüge enthält, möglichst verständlich in einer Ansicht darzustellen ist. Der Fokus liegt hierbei auf der lokalen und der temporalen Verknüpfung der Informationen, da diese jeweils eine intuitive Darstellungsform aufweisen: eine Liste für den temporalen Zusammenhang und eine dreidimensionale Darstellung für den lokalen Zusammenhang.

Systematisch ergeben sich fünf Möglichkeiten (Abbildung 37):

- A. die Integration der Listenform des zeitlichen Bezugs in die Geometriedarstellung,
- B. die Integration der Geometriedarstellung in die Listenform des zeitlichen Bezugs,
- C. der Verzicht auf die Darstellung des temporalen Zusammenhangs,
- D. der Verzicht auf die Darstellung des geometrischen Zusammenhangs oder
- E. eine getrennte Darstellung beider Bezugsformen.



13237

Abbildung 37: Mögliche Darstellungsformen beider Bezugsformen:
Integration der Liste in die Geometriedarstellung (A.), Integration der Geometrie in Listenform (B.),
Verzicht auf die Darstellung des temporalen (C.) oder geometrischen Zusammenhangs (D.),
Darstellung beider Bezugsformen in getrennten Bereichen (E.)

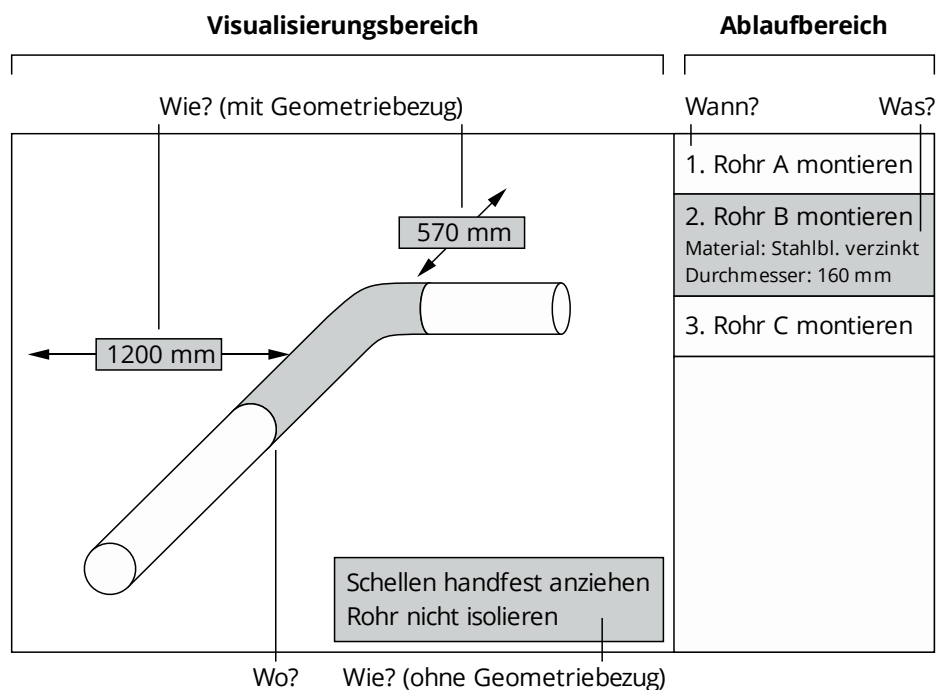
Bei den ersten beiden Varianten würde jeweils eine der intuitiven Darstellungsformen aufgebrochen: eine dreidimensionale, ggf. in AR dargestellte Arbeitsschrittliste (A.) wäre komplizierter zu lesen als ihr herkömmliches zweidimensionales Pendant und funktioniert nur dann, wenn die jeweils nächsten Arbeitsschritte noch im Sichtbereich liegen; eine Geometriedarstellung in Listenform (B.) ginge zu Lasten der Übersichtlichkeit. Der Verzicht auf eine der Darstellungen (C., D.) würde dem Mitarbeiter wesentliche Informationen, die er zum Verständnis der auszuführenden Arbeiten benötigt, vorenthalten.

Die Beobachtung der Arbeitsweise von Mitarbeitern aus Fertigungen unterschiedlicher Unternehmen zeigt folgendes Verhalten:

- Zwischen den Arbeitsschritten klären die Mitarbeiter die Fragen *Wann?* und *Was?* Hierfür nutzen sie den zeitlichen Bezug der Arbeitsinhalte zueinander.
- Während eines Arbeitsschritts klären die Mitarbeiter die Fragen *Wo?* und *Wie?* Hierfür nutzen sie den geometrischen Bezug bzw. greifen sie auf zusätzliche Informationen mit modalem Bezug zu.

Dies spricht dafür, die Bezugsformen bewusst getrennt voneinander darzustellen (E.): Ein *Visualisierungsbereich* stellt die geometrisch verknüpften Informationen dar, ein *Ablaufbereich* die zeitliche Abfolge. Modale Informationen sind über den Ablaufbereich arbeitsschrittspezifisch aufrufbar.

Für die Auslegung der Benutzeroberfläche ergibt sich damit folgende Richtlinie: Informationen, die der Klärung der Fragen *Wann?* und *Was?* dienen, sind im Ablaufbereich darzustellen; Informationen, die der Klärung der Frage *Wo?* dienen, im Visualisierungsbereich. Modale Informationen zur Klärung der Frage *Wie?* sind als Annotationen darzustellen. Haben die Annotationen einen geometrischen Bezug, so ist dieser zu kennzeichnen. Abbildung 38 verdeutlicht dies an einem Beispiel für eine Informationsanzeige.



13238

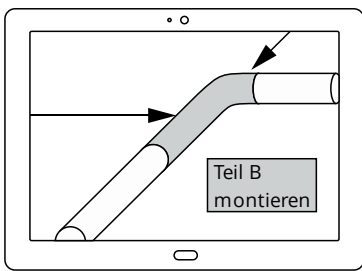
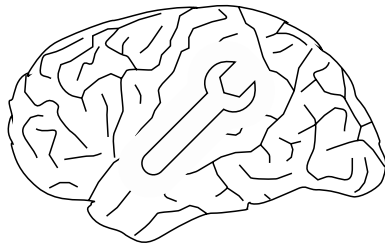
Abbildung 38: Exemplarischer Entwurf einer Informationsanzeige zur Verdeutlichung der Zuordnung und Darstellung von Informationen

4.2.2 Informationsbedarf und Kategorisierung

Um eine zweckdienliche Informationsanzeige zu ermöglichen, muss der Informationsbedarf der jeweiligen Mitarbeiter in dem jeweiligen Szenario bekannt sein. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Fertigung von Unikaten und Produkten mit Unikatcharakter.

Hierbei ist allerdings zu beachten, dass – wenngleich das entstehende Produkt ein Einzelstück ist – manche Arbeitsschritte Wiederholertätigkeiten sind. Es ist deshalb wichtig zu unterscheiden, ob eine dargestellte Information den Unikatanteil der Tätigkeit sinnvoll unterstützt oder eine bekannte Wiederholertätigkeit mit Informationen anreichert, die bereits im Erfahrungswissen des Mitarbeiters sind, sodass sie ihm keinen Mehrwert bieten und ihn ggf. sogar von relevanten Informationen ablenken. Abbildung 39 trifft eine Differenzierung und erläutert sie anhand der Anwendungsbeispiele.

Der Informationsbedarf in der Unikatfertigung ergibt sich dementsprechend aus den Informationen, die die Mitarbeiter benötigen, um die vorliegende Aufgabe unter Einsatz eines üblichen Erfahrungswissens auszuführen.

Gesamtaufgabe	
Unikatanteil	Serienanteil
 Informationsbedarf	 Erfahrungswissen

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Rohrhalter befestigen

Länge	Schweißrichtlinie	Bedienung Drehmomentschlüssel
Bauteilnummer		Schraubposition
Halterposition	Anzugsmoment	Bedienung Schweißgerät

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Draht verlegen

elektronische Bauteile	Drahtlänge	Funktionsprinzip der Klemme
Drahtfarbe	Drahtverlauf	Abisolieren
Klemmenposition	Klemmenname	Bedienung Schraubenzieher
	Drahtquerschnitt	

13239

Abbildung 39: Einteilung des Informationsbedarfs in Unikatanteil und Wiederholanteil

Für alle Informationen, die die Mitarbeiter zur Erfüllung des Unikatanteils der Arbeitsschritte benötigen, ist eine möglichst verständliche Darstellungsform zu finden, die den

Aufwand für die Informationsinterpretation senkt. Hierbei ist zu beachten, dass die Aussagen der Mitarbeiter über die benötigten Informationen häufig von der aktuellen Informationslage geprägt sind. Beispiele für nur vermeintlich benötigte Informationen sind:

- Schaltplan
- zweidimensionale Zeichnung
- Bedienungsanleitung
- Datenblatt
- Einbauanleitung

Die Darstellung dieser Informationen auf mobilen Endgeräten gleicht letztlich einer einfachen Digitalisierung bestehender Informationsmedien und führt allenfalls zu einer Verringerung des Aufwands für die Informationsbeschaffung und -suche. Tatsächlich benötigen die Mitarbeiter lediglich einzelne Informationen aus den Dokumenten. Häufig nennen Mitarbeiter auch Stellvertreterinformationen, wie bspw. *Nennstrom* oder *Fließrichtung des Wassers im Rohr*. Sie benötigen diese Informationen allerdings nicht unmittelbar für die Ausführung ihrer Tätigkeit, sondern nutzen sie, um sich eine andere, meist fehlende Information zu erschließen – im Beispiel den Drahtquerschnitt bzw. das Gefälle des Rohres.

Um erkennen zu können, welche Informationen die Mitarbeiter tatsächlich benötigen, und wie diese darzustellen sind, muss bekannt sein, wofür die Mitarbeiter die Information verwenden. Hierfür eignen sich die zuvor aufgezählten Zwecke der Informationen:

- *Wann?*
Diese Informationen geben dem Mitarbeiter Aufschluss darüber, wann er den Arbeitsschritt auszuführen hat, und geben damit eine Reihenfolge vor. Die Reihenfolge muss nicht zwangsläufig eine aus den indirekten Bereichen vorgegebene sein, sondern kann sich auch aufgrund der Informationen ergeben (bspw. nach Bauteilnummer oder Bauteilposition).
- *Was?*
Die Informationen dienen dem Mitarbeiter zur Identifikation des Arbeitsinhalts, typischerweise ist dies ein Bauteil, dessen Eigenschaften für den Mitarbeiter so beschrieben sein müssen, dass er es möglichst schnell (ggf. in einer Menge weiterer Bauteile) erkennen kann.
- *Wo?*
Die Informationen geben dem Mitarbeiter geometrische Parameter vor, anhand derer er den Arbeitsschritt ausführt. Typischerweise verlangen die Mitarbeiter nach einer Soll-Position und Ausrichtung des Bauteils oder Maßen zu Referenzbauteilen.
- *Wie?*
Weitere Informationen detaillieren den auszuführenden Vorgang.

Hieraus ergibt sich für die beiden Anwendungsbeispiele folgender Informationsbedarf:

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Informationsbedarf und Einordnung

Wann? Bauteilposition

Da die indirekten Bereiche keine Reihenfolge innerhalb des Arbeitspakets vorgeben, legen die Mitarbeiter die Reihenfolge selbst fest, typischerweise anhand der Bauteilanordnung (z. B. von links nach rechts auf der Sektion).

Was? Bauteilnummer, Bauteilgeometrie

Die Mitarbeiter identifizieren die Bauteile hauptsächlich anhand ihrer Geometrie, bei geometrisch ähnlichen Bauteilen verwenden sie die Bauteilnummer.

Wo? Bauteilposition, Bauteilausrichtung, Bauteilgeometrie, Bemaßung, Halterbereiche

Der Informationsbedarf nach Halterbereichen ergibt sich daraus, dass Rohrhalter nicht konstruiert sind, und die Mitarbeiter die Position anhand von Richtlinien wählen.

Wie? Materialbezeichnung, Rohrdurchmesser

Die Informationen geben den Mitarbeitern Aufschluss über Bearbeitungsverfahren.

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Informationsbedarf und Einordnung

Wann? zugehöriges elektronisches Bauteil, Drahtfarbe, Drahtlänge, Drahtquerschnitt

Auch in der Schaltschrankverdrahtung ist keine Reihenfolge vorgegeben. Die Mitarbeiter wählen die Reihenfolge so, dass einer der Parameter (bspw. Drahtquerschnitt) in aufeinanderfolgenden Schritten gleichbleibt.

Was? Drahtfarbe, Drahtlänge, Drahtquerschnitt

Die Mitarbeiter wählen vorkonfektionierte Drähte anhand der drei Parameter aus.

Wo? zugehörige elektronische Bauteile, Klemmen an den Bauteilen, Drahtverlauf

Wie? Hinweise für Sonderbauteile

Einige Bauteile erfordern eine besondere Drahtführung oder -befestigung, die der Mitarbeiter beachten muss.

Die Beispiele zeigen, dass der Informationsbedarf vom Anwendungsfall abhängt. Vor allem die Identifikation der Bauteile unterscheidet sich in beiden Szenarien deutlich.

Darstellungsform

Die Darstellung der Informationen soll den Mitarbeitern ein möglichst gutes Verständnis vom auszuführenden Arbeitsschritt vermitteln. Bei der Wahl der Darstellungsform ist daher zu beachten, dass die kognitive Belastung (vgl. Abschnitt 3.2.1) möglichst gering ausfällt. Daraus ergeben sich zwei Fragestellungen:

1. Welche Darstellungsform ist die geeignete für eine gegebene Information?
2. Falls die Darstellungsform nicht existiert: Ist es lohnenswert, diese aufzubereiten?

Um die kognitive Leistung, die zum Erfassen der Informationen notwendig ist, möglichst gering zu halten, sollten folgende Regeln Beachtung finden:

- Geometrisch zusammengehörige Informationen sollten optisch verknüpft sein [Swel90, S. 128].

- Die Darstellungsform sollte so wenig Abstraktionsvermögen abverlangen wie möglich [Plas10, S. 188].
- Überaufbereitete – also nur der Optik dienliche – Darstellungsformen sind zu vermeiden [Maye03, S. 48]. Hierzu zählt bspw. die dreidimensionale Textdarstellung [Stue11, S. 210].

Aus den Forderungen ergibt sich, dass die benötigten Informationen möglichst in einer selbsterklärenden Form darzustellen sind. Häufig liegen Informationen jedoch nicht in einer Darstellungsform vor, die für die Fertigungsmitarbeiter intuitiv verständlich wäre. In diesem Fall stellt sich die Frage, ob es lohnenswert ist, die Information in die gewünschte Darstellungsform zu bringen – sie aufzubereiten.

Informationsaufbereitung

Informationsaufbereitung kann an verschiedenen Stellen stattfinden. Ausgehend von den im Unternehmen vorliegenden Informationen (bspw. einem 3D-CAD-Modell, einer Bauteilliste und Richtlinien im PDF-Format) können Mitarbeiter der indirekten Bereiche die Informationen manuell so aufbereiten, dass sie in der gewünschten Darstellungsform in der Anwendung vorliegen. Alternativ kann die Anwendung vorliegende Informationen automatisch in die gewünschte Darstellungsform überführen. Abbildung 40 verdeutlicht, an welchen Schnittstellen eine Aufbereitung der Informationen stattfinden kann.

Dieser Prozess muss nicht zwangsläufig dazu führen, dass die erstellten Informationen komplexer sind als die zugrundeliegenden. Bspw. ist auch das Extrahieren von Maßen (eine Textinformation) aus einem 3D-CAD-Modell eine Aufbereitung von Informationen, da es diese für den Empfänger in eine intuitiv verständliche Form bringt.

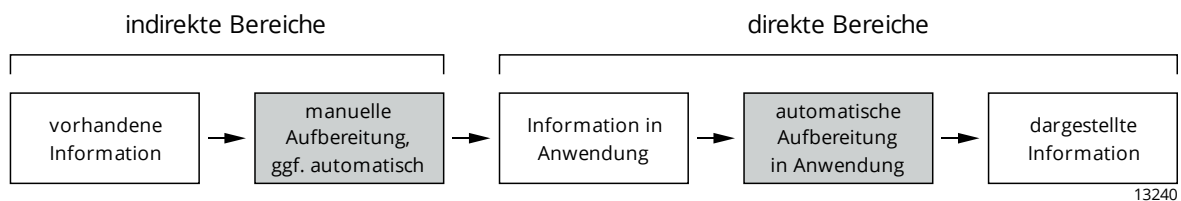


Abbildung 40: Mögliche Punkte der Informationsaufbereitung

Um beurteilen zu können, ob es lohnenswert ist, die Informationen aufzubereiten, sind sowohl die direkten Bereiche zu betrachten, die Informationen verwenden, als auch die indirekten Bereiche, die Informationen erzeugen. Für viele Produktbestandteile erstellt die Konstruktionsabteilung ein 3D-CAD-Modell, das sich direkt in AR als Einblendung des Soll-Zustands in die Umgebung verwenden lässt. An anderen Stellen ergeben sich allerdings Lücken zwischen der in der Datenbasis vorhandenen und der wünschenswerten Repräsentation: Informationen liegen nur in abstrakter Form vor, sodass sie in der Regel nur mit Erfahrungswissen verständlich und ggf. nur unter kognitivem Aufwand anwendbar sind.

Auch in den Anwendungsbeispielen treten mehrere solcher Informationslücken auf. Drei davon seien an dieser Stelle zur Verdeutlichung der Problematik genannt:

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Halterbereiche

Das Unternehmen verzichtet aus Zeit- und Kostengründen auf die Konstruktion von Rohrhaltern in CAD, sodass weder ein 3D-Modell der Halter vorhanden ist, noch deren konkrete Positionen bekannt sind. Stattdessen legen die Mitarbeiter der Fertigung die Halterpositionen anhand von Richtlinien fest, die in schriftlicher Form vorliegen und bspw. die Anweisung enthalten, einen bestimmten Rohrtyp alle 1750 mm mit einem Halter zu befestigen.

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Drahtverläufe

Das Unternehmen setzt im E-CAD-System die Anschlusspunkte von Drähten zwischen den elektronischen Komponenten der hergestellten Schaltschränke, gibt jedoch keinen spezifischen Drahtverlauf, keinen Querschnitt und keine Drahtfarben oder -längen vor. Alle Informationen erschließen sich die Mitarbeiter der Fertigung selbst, wiederum aus Richtlinien, Erfahrungswissen bzw. Augenmaß.

Beide Anwendungsbeispiele: Reihenfolgen

Beide Unternehmen verzichten darauf, Arbeitsreihenfolgen innerhalb der Arbeitspakete festzulegen. Die Mitarbeiter wählen die Reihenfolgen selbst anhand geometrischer Eigenschaften (von links nach rechts auf der Sektion) oder Textinformationen (Drahtfarbe, -querschnitt).

Es ergeben sich drei mögliche Verfahrensweisen zur Darstellung solcher Informationen für die Mitarbeiter der Fertigung:

1. Die Mitarbeiter beziehen die Information weiterhin aus der herkömmlichen Form und aus Erfahrungswissen.
2. Die digitale Arbeitsunterlage bereitet die Informationen mithilfe eines Werkzeugs bestmöglich auf, sodass sie der gewünschten Darstellungsform nahekommt.
3. Mitarbeiter der indirekten Bereiche bereiten die Informationen manuell auf oder erstellen sie.

Abbildung 41 stellt die drei Möglichkeiten für das erste Beispiel einander gegenüber. Der Aufbereitungsgrad der Informationen zwischen den Möglichkeiten 2) und 3) lässt sich dabei flexibel gestalten.

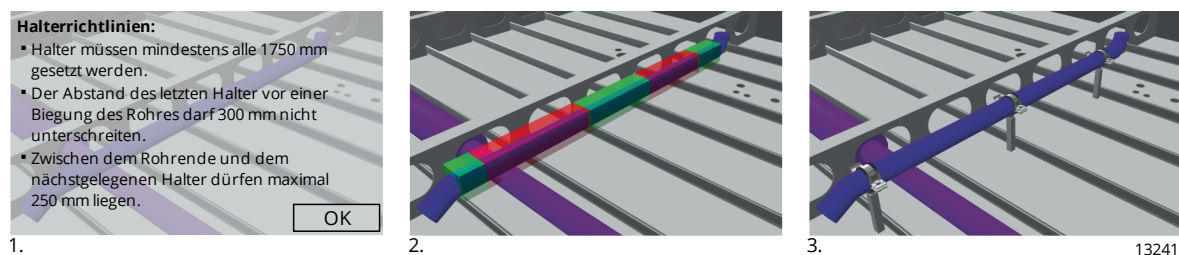


Abbildung 41: Vergleich unterschiedlicher Aufbereitungsgrade der Information *Halterposition*: gering, in Textform (1.), mittel, als Bereichsdarstellung (2.) und hoch, als vollständig konstruiertes 3D-Modell (3.)

Aus den drei Varianten entstehen jeweils unterschiedliche Aufwände für die Mitarbeiter der direkten bzw. indirekten Bereiche bei der Informationsinterpretation bzw. Informationserstellung. Abbildung 42 verdeutlicht diesen Zusammenhang schematisch.

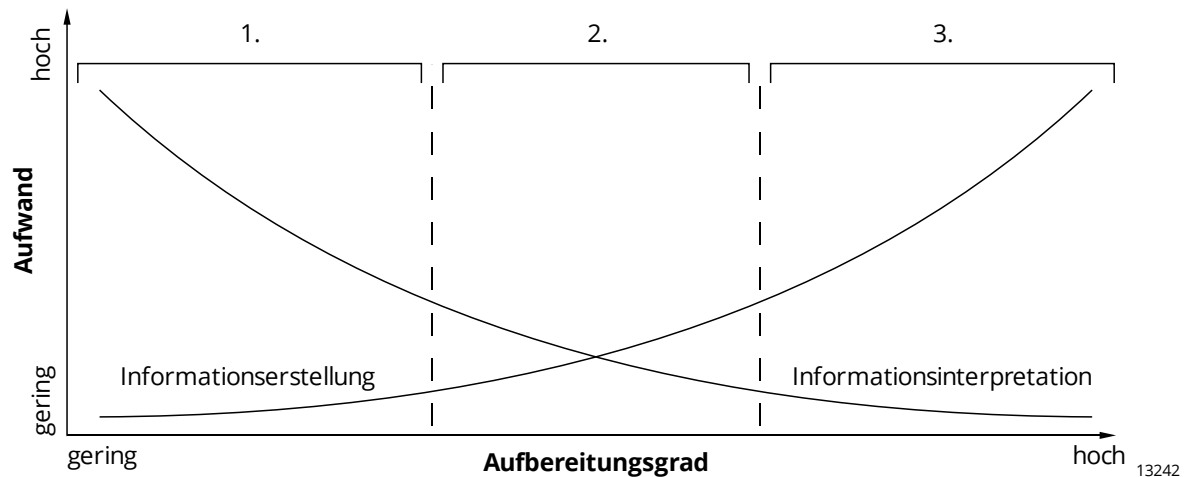


Abbildung 42: Aufwände für Informationsinterpretation und Informationserstellung

Für die Auswahl der Art der Informationsdarstellung stellt sich die Frage, in wieweit eine Einsparung in den direkten Bereichen den Aufbereitungsaufwand in den indirekten Bereichen rechtfertigt. Die Antwort darauf kann vor dem Hintergrund, der Ausgangssituation und der Zielsetzung des Unternehmens unterschiedlich ausfallen. Bei der typischen Zielsetzung der Kostensenkung per Produktivitätssteigerung lässt sich folgende Gleichung als Entscheidungskriterium für eine Aufbereitung heranziehen:

$$t_{IG} \cdot K_{indirekt} \leq (t_{II,alt} - t_{II,neu}) \cdot N_{IA} \cdot P(I) \cdot K_{direkt} \quad (10)$$

t_{IG} Zeit für die Erstellung der Information

$t_{II,alt}$ Interpretationszeit mit herkömmlichem Informationsprozess

$t_{II,neu}$ Interpretationszeit mit innoviertem Informationsprozess

N_{IA} Anzahl der Informationsaufrufe

$P(I)$ Wahrscheinlichkeit für die Relevanz der Information

$K_{indirekt}$ Stundenlohn des Mitarbeiters im indirekten Bereich

K_{direkt} Stundenlohn des Mitarbeiters im direkten Bereich

Ist der Aufwand für die Aufbereitung, multipliziert mit dem Stundenlohn der Mitarbeiter indirekter Bereiche, niedriger als die potenzielle Zeiteinsparung in der Fertigung multipliziert mit dem dort üblichen Stundenlohn und der Anzahl der Informationsaufrufe – in der Unikatfertigung typischerweise eins – sowie der Wahrscheinlichkeit, dass die Information für einen Mitarbeiter relevant ist, lohnt eine Aufbereitung. Die Wahrscheinlichkeit lässt sich dabei unmittelbar aus den Angaben der Mitarbeiter zur Nutzungshäufigkeit ableiten (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Konstruktion von Drahtverläufen

Bei einer manuellen Aufbereitung der Informationen Drahtfarbe und Drahtquerschnitt fallen für einen exemplarischen Schaltschrank 7,4 Minuten Zusatzaufwand in den indirekten Bereichen an, während die Fertigungsmitarbeiter 11,8 Minuten weniger mit Informationstätigkeiten verbringen. Die Wahrscheinlichkeit für die Relevanz der Informationen ist dabei zehn Prozent, da die Mitarbeiter sie für jeden Draht benötigen. Es ergibt sich mit einem Lohn von 2576 bzw. 3435 €/Monat und einer 35-Stunden-Woche bei 220 Arbeitstagen pro Jahr:

$$7,4 \text{ min} \cdot \frac{0,446 \text{ €}}{\text{min}} = 3,30 \text{ €} \leq 3,95 \text{ €} \cdot n_{II} = 11,8 \text{ min} \cdot n_{II} \cdot 100 \% \cdot \frac{0,329 \text{ €}}{\text{min}}$$

Die Aufbereitung der Informationen lohnt sich entsprechend ab dem ersten Schaltschrank, der Vorteil steigt bei weiteren Exemplaren an.

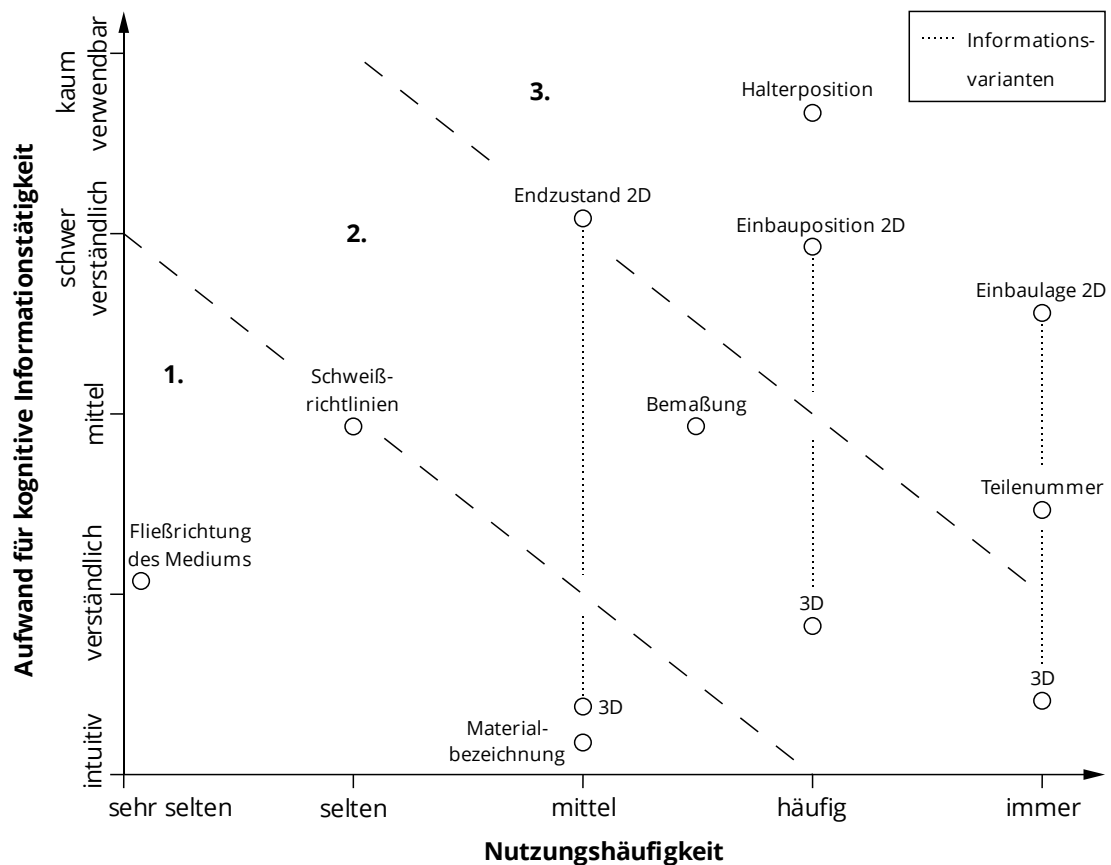
Entsprechend andere Entscheidungskriterien sind notwendig, wenn das Ziel der AR-Einführung eine Qualitätssteigerung durch Fehlervermeidung oder eine Verringerung der Durchlaufzeit ist. Eine andere Gewichtung entsteht zudem bei einem Mangel an Fachkräften in den direkten Bereichen oder weichen Zielen wie der Mitarbeiterzufriedenheit oder einer verbesserten Außenwirkung des Unternehmens durch den Einsatz neuer Technologien.

Das in Abschnitt 3.1.3 aufgezeigte Vorgehen zur Aufnahme der verwendeten Informationen lässt sich als Entscheidungshilfe über die Darstellungsform und den Aufbereitungsgrad weiterverwenden. Die Befragung der Mitarbeiter nach dem Aufwand für kognitive Informationstätigkeiten pro benötigter Information ergibt dabei die potenzielle Zeiteinsparung bei optimaler Aufbereitung. Eine beispielhafte Darstellung der Informationsnutzung auf diese Weise ist in Abbildung 43 zu sehen. Zur Verdeutlichung sind die Informationen aus dem Anwendungsbeispiel Schiffbau eingetragen.

Es lassen sich pro Information nun die Maßnahmen für die zu wählende Darstellungsform ableiten. Für selten genutzte und bereits verständliche Informationen ist eine weitere Aufbereitung nicht lohnenswert (Bereich 1), sie können weiterhin in der vorhandenen Darstellungsform für die Fertigungsmitarbeiter verfügbar sein. Dies gilt häufig für einfache Informationen ohne geometrischen Bezug oder hinterlegte Dokumente wie Einbauanleitungen, die Mitarbeiter nur selten aufrufen.

Für häufig genutzte und unverständliche Informationen kann eine Aufbereitung lohnen (Bereich 3). Dies sind häufig Informationen mit geometrischem Bezug. Bevor eine explizite Aufbereitung der Informationen für Bereich 3 stattfindet, ist allerdings sorgfältig zu prüfen, ob sich diese nicht automatisieren lässt.

Informationen dazwischen (Bereich 2) sind auf Basis vorhandener Informationen bestmöglich automatisiert aufzubereiten. Das soll mit sogenannten Werkzeugen für die digitale Arbeitsunterlage geschehen (siehe Abschnitt 4.4).



13243

Abbildung 43: Kognitiver Aufwand und Nutzungshäufigkeit von Informationen als Entscheidungshilfe für die Darstellungsform

4.2.3 Informationsumfang und -zeitpunkt

Eine effiziente Informationsversorgung erfordert einen geeigneten Informationsumfang (vgl. Anforderung V3). Der Mitarbeiter soll alle Informationen sehen, die er zum jeweiligen Zeitpunkt benötigt, darüber hinaus aber keine weiteren Informationen, die ihn ablenken können, oder die er herausfiltern muss. Pro benötigter Information gilt es herauszufinden, welches Zeitverhalten sie aufweist (vgl. Abschnitt 2.2.2), also wann der Mitarbeiter sie benötigt. Hierzu lassen sich vier Klassen von Informationen aufstellen:

- Klasse I:
Informationen, die Mitarbeiter *immer* benötigen (bspw. eine Bauteilnummer)
- Klasse K:
Informationen, die Mitarbeiter für mehrere *kontinuierliche* Arbeitsschritte benötigen (bspw. Maße)
- Klasse S:
Informationen, die Mitarbeiter *sporadisch* benötigen (bspw. die Materialart)
- Klasse H:
Informationen als *Hinweise*, die Mitarbeiter grundsätzlich beachten sollen (aber nicht zwingend für die Bewältigung der Aufgabe benötigen, bspw. Richtlinien)

Für die Steuerung der dargestellten Informationsmenge ergeben sich drei Möglichkeiten: Die Anwendung wählt automatisch für den Benutzer die notwendigen Informationen aus, der Benutzer interagiert mit der Anwendung, um die gewünschten Informationen anzuzeigen, oder Mitarbeiter der indirekten Bereiche wählen die Informationen im Vorwege aus. Die Vor- und Nachteile der drei Varianten ergeben sich aus den Forderungen nach einer beschleunigten Informationserfassung (V3) durch einen geeigneten Informationsumfang sowie möglichst geringen Aufwänden in der Vorbereitung (P1) und in der Nutzung (P2) und sind in Abbildung 44 dargestellt. Jedem Vor- und Nachteil ist dabei zugeordnet, auf welche der vier Informationsklassen er zutrifft.

Steuerung	durch Anwendung	durch Benutzer	durch indirekte Bereiche
Vorteile	Klasse I: • Einsparung von Interaktion	Klassen I, K, S: • geeigneter Informationsumfang	Klasse H: • zu beachtende Informationen bekannt
Nachteile	Klassen K, S, H: • Umfang nicht prognostizierbar	Klasse I: • überflüssige Interaktion Klasse H: • übersehene Informationen	Klassen I, S: • Umfang nicht prognostizierbar Klassen I, K, S: • erhöhter Einsatz teurer Mitarbeiter
Eignung	Klasse I	Klassen K, S	Klasse H

13244

Abbildung 44: Vergleich der Methoden zur Informationssteuerung

Für alle drei Arten der Steuerung zeigt sich, dass die Informationsklassen, in denen sie Vor- bzw. Nachteile bieten, im Wesentlichen disjunkt sind. Hieraus ergibt sich direkt eine Eignung der jeweiligen Steuerung für bestimmte Informationsklassen: Die Anwendung eignet sich, um immer benötigte Informationen auszuwählen; Benutzer wählen kontinuierlich und sporadisch benötigte Informationen aus; die indirekten Bereiche legen zu beachtende Informationen fest.

Bei der Steuerung durch den Benutzer stellt sich die Frage, in wieweit die Unterscheidung zwischen kontinuierlich und sporadisch benötigten Informationen zielführend ist. Diese lässt sich über eine Abschätzung der Anzahl notwendiger Interaktionsschritte beantworten. Zum Vergleich stehen zwei Strategien der Informationseinblendung:

- dauerhafte Einblendung: Der Nutzer blendet per Interaktion Informationen ein. Diese bleiben solange eingeblendet, bis er sie wieder ausblendet.
- bedarfsweise Einblendung: Der Nutzer blendet per Interaktion Informationen ein. Die Anwendung blendet die Informationen beim nächsten Arbeitsschritt aus.

Die dritte Möglichkeit, die bedarfsweise Ausblendung, wenn der Nutzer eine Information nicht benötigt, ist bewusst ausgelassen, da sie hohes Potenzial für Nutzerunzufriedenheit

bietet, was der Anforderung A1 entgegensteht. Für selten genutzte Informationen ist es effizienter, wenn der Nutzer sie jeweils einzeln einblendet, für häufig genutzte Informationen ist eine dauerhafte Einblendung wirksamer, die der Benutzer abschalten kann. Die Grenze liegt bei ca. 50 Prozent Nutzungswahrscheinlichkeit. Sofern die Kontinuität der Nutzung für die Information bekannt ist – bspw. weil der Mitarbeiter sie immer mindestens fünf Arbeitsschritte in Folge benötigt – kann sich diese Grenze nach unten verschieben.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Informationsklassen

Es ergeben sich aufgrund der Aussagen der Mitarbeiter der Fertigung folgende Informationsklassen für die Montage der Ausrüstungsbauteile auf den Sektionen:

Klasse I (immer):	Bauteilgeometrien, Bauteilnummern
Klasse K (kontinuierlich):	Bemaßungen, Endzustand, Halterbereiche
Klasse S (sporadisch):	Rohrdurchmesser, Materialbezeichnung
Klasse H (Hinweise):	-

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Informationsklassen

Es ergeben sich aufgrund der Aussagen der Mitarbeiter der Fertigung folgende Informationsklassen für die Verdrahtung von Schaltschränken:

Klasse I:	Drahtverlauf, Drahtlänge, Drahtfarbe, Drahtquerschnitt
Klasse K:	Endzustand
Klasse S:	Schaltplan
Klasse H:	Sonderbauteile

4.3 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche ist auf Basis der Anforderungen und der zuvor herausgearbeiteten Richtlinien entstanden. Der folgende Abschnitt leitet die benötigten Funktionen und Elemente her und baut anhand der Anforderungen an die jeweiligen Elemente nach und nach die Benutzeroberfläche auf (vgl. [Hala14b, S. 497ff.]). Grundsätzlich ist für die Zielgruppe der Anwendung – Fertigungsmitarbeiter, die ggf. Arbeitshandschuhe tragen – wichtig, dass die Bedienung keine hohe Präzision erfordert. Ausreichend große Bedienelemente sind daher eine Voraussetzung für die effiziente Bedienung.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die wichtigsten Interaktionsschritte in der Anwendung auch einhändig erfolgen können, sodass die zweite Hand für andere Aktivitäten freibleibt, wie bspw. das Halten eines Werkzeugs oder das Ausrichten eines Werkstücks. Hierfür muss der Nutzer die Aktionen mit derselben Hand ausführen können, mit der er das Gerät festhält. Bereiche für häufige Interaktionen sollten entsprechend an den Rändern des Touch-Displays angeordnet sein. Abbildung 45 verdeutlicht dies. Die Oberfläche benötigt die im Folgenden aufgeführten Funktionen.

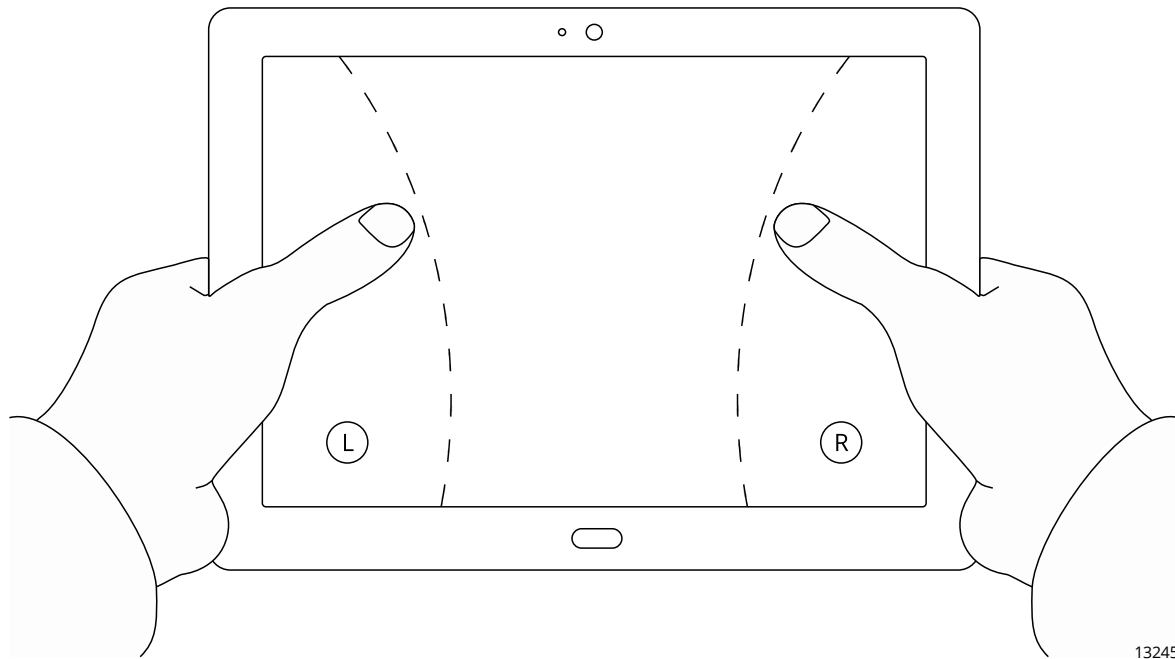


Abbildung 45: Bedienbereiche des Geräts, wenn der Benutzer das Gerät in beiden Händen (L + R), nur mit der linken (L) oder nur mit der rechten Hand hält (R)

4.3.1 Informationsdarstellung

Um die Informationserfassung für die Mitarbeiter zu beschleunigen (Anforderung V3) und die Informationsinterpretation zu vereinfachen (Anforderung V4), muss der Visualisierungsbereich die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Er unterstützt eine dreidimensionale Ansicht, um die Informationen intuitiv darstellen zu können.
- Er zeigt alle zum jeweiligen Zeitpunkt benötigten Informationen mit geometrischem Bezug in einer integrierten Darstellung an, um den Split-Attention-Effect zu verringern.
- Um dem Benutzer die Interpretation der Arbeitsinhalte zu erleichtern, blendet der Anzeigebereich diese in die reale Umgebung ein (AR-Modus).
- Er bietet ausreichend Fläche, um die Informationen möglichst groß und gut erkennbar darstellen zu können.

In folgenden Montagesituationen ist die Darstellung von Inhalten in AR aufgrund der Kopplung der Ansicht an das Tracking ungeeignet oder nicht möglich:

- Der Nutzer kann den gewünschten Blickwinkel für die AR-Ansicht in der realen Umgebung nicht herstellen (bspw. die Draufsicht auf eine Schiffssektion).
- Die physische Größe der virtuellen Inhalte überschreitet das in der Realität von der Kamera erfassbare Bild (bspw. ein Schiffsmotor).

- Die Inhalte befinden sich außerhalb des momentanen Aufenthaltsbereichs des Nutzers (bspw., wenn dieser gerade die benötigten Bauteile aus einem Lager holt).

Alle drei Varianten verdeutlichen den Bedarf nach einer zusätzlichen, vom Tracking unabhängigen Ansicht der 3D-Inhalte – einem CAD-Modus –, der die AR-Ansicht ersetzt. Für eine intuitive Bedienung sollen die Bedienkonzepte der Anwendung weitestgehend unabhängig vom Modus sein, in dem sie sich befindet.

Abbildung 46 zeigt den Visualisierungsbereich mit Informationen, einem Bauteil mit Einbaubemaßung, die in die reale Umgebung eingeblendet sind. Er nimmt zunächst die gesamte verfügbare Bildschirmfläche ein. Für alle weiteren Elemente gilt, dass sie einen möglichst geringen Teil des Visualisierungsbereichs verdecken dürfen.

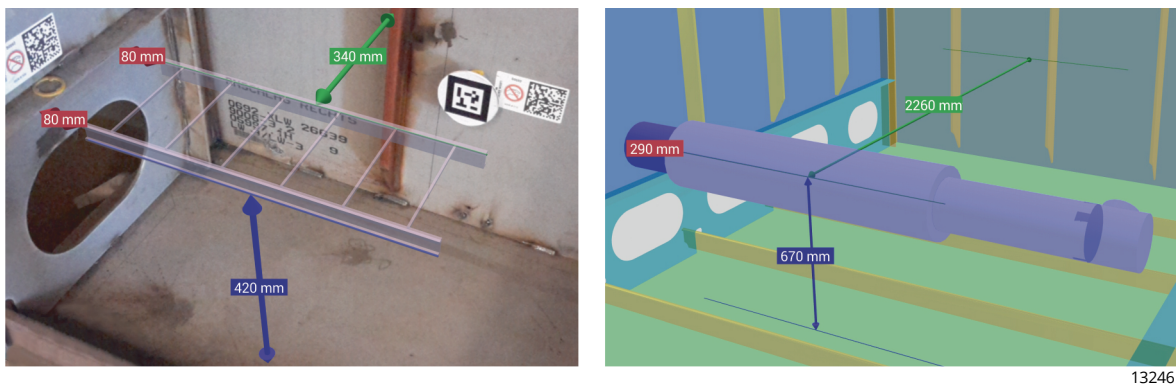


Abbildung 46: Visualisierungsbereich auf gesamter Bildschirmfläche: AR-Modus (links) und CAD-Modus (rechts)

Die digitale Arbeitsunterlage stellt im Anzeigebereich alle geometriebezogene Informationen

- der Klasse I, die die Anwendung automatisch aufgrund des aktuell im Ablaufbereich ausgewählten Arbeitsschritts darstellt,
- der Klasse K, die der Mitarbeiter für die kontinuierliche Nutzung in der Inhaltsauswahl festgelegt hat,
- der Klasse S, die der Mitarbeiter im aktuellen Arbeitsschritt abgefragt hat, und
- der Klasse H, die ein Mitarbeiter eines indirekten Bereichs für die Einblendung im aktuellen Arbeitsschritt vorgesehen hat, dar.

In der prototypischen Umsetzung blendet die digitale Arbeitsunterlage im AR-Modus die Informationen in das Bild der integrierten rückseitigen Tablet-Kamera ein, das Konzept sieht allerdings auch andere Möglichkeiten vor: Erfordert der Anwendungsfall bspw. eine statische Draufsicht an einem stationären Arbeitsplatz, lässt sich das Bild auch von einer externen, fest installierten Kamera beziehen.

4.3.2 Ablaufsteuerung

Der Benutzer benötigt eine Möglichkeit, die Inhalte zeitlich zu steuern, sodass der Anzeigebereich nur die Informationen enthält, die im aktuellen Arbeitsschritt relevant sind. Hierbei treten zwei Arten von Bezug auf:

- Interaktionen mit Arbeitspaketbezug wie die Auswahl oder der Wechsel des Arbeitspakets oder der Aufruf von arbeitspaketspezifischen Informationen wie z. B. einer Übersichtszeichnung
- Interaktionen mit Arbeitsschrittbezug wie die Auswahl eines Arbeitsschritts innerhalb des Arbeitspakets, Bestätigen ausgeführter Arbeitsschritte oder der Aufruf arbeitsschrittspezifischer Klasse-S-Informationen wie z. B. Materialeigenschaften

Beide Arten enthalten sehr vergleichbare Interaktionen, lediglich der Bezug der Interaktionen ist unterschiedlich, wobei Interaktionen mit Arbeitspaketbezug solchen mit Arbeitsschrittbezug logisch übergeordnet sind. Der Bildschirmbereich für die Ablaufsteuerung teilt sich daher in zwei Teile: Arbeitspaketbereich und Arbeitsschrittbereich. Der Arbeitspaketbereich muss die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Um den Arbeitsinhalt schnell identifizieren zu können, benötigt der Nutzer einen Überblick darüber. Dieser kann – unternehmensspezifisch – bspw. aus dem Arbeitspaketnamen oder einem Baugruppennamen bestehen.
- Um zu verhindern, dass Mitarbeiter versehentlich die mobilen Endgeräte verwechseln und falsche Informationen beziehen, blendet der Arbeitspaketbereich bei mobiler Nutzung den Namen ein, mit dem der Mitarbeiter sich angemeldet hat.
- Der Nutzer benötigt Interaktionsmöglichkeiten zum Aufruf arbeitspaketspezifischer Informationen.

Der Arbeitsschrittbereich muss die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Der Mitarbeiter muss aus einer Menge von Arbeitsschritten denjenigen auswählen können, den er bearbeiten möchte. Wie zuvor dargestellt, ist eine geordnete Liste hierfür geeignet.
- Damit der Benutzer Arbeitsschritte möglichst schnell identifizieren kann, müssen die Einträge in der Liste für ihn aussagekräftige Informationen enthalten.
- Um die Orientierung im Arbeitsablauf zu erleichtern, muss die Liste eindeutig erkennntlich machen, welches der aktuelle Arbeitsschritt ist, welche Arbeitsschritte bereits erfolgt sind und welche ausstehen.
- Damit der Benutzer schnell auf arbeitsschrittbezogene Klasse-S-Inhalte zugreifen kann, müssen sich diese direkt über ihren Eintrag in der Liste aufrufen lassen.
- Arbeitsschrittbezogene Aktionen – die Bestätigung des Arbeitsschritts oder eine Fehlerrückmeldung – müssen sich ebenfalls direkt von einem Eintrag in der Liste vollziehen lassen.

Die Herleitung der Darstellungsform für die Ablaufsteuerung begleitet Abbildung 47. Um zu entscheiden, auf welche Weise die Arbeitsschrittliste darzustellen ist, sind zunächst deren Elemente zu betrachten. Diese enthalten Informationen, die den Arbeitsschritt für den Nutzer beschreiben, bspw. eine Bauteilnummer oder eine Tätigkeitsbeschreibung. Um es dem Nutzer zu erleichtern, einen Arbeitsschritt zu identifizieren und ihn den geometrischen Informationen im Visualisierungsbereich zuzuordnen, zeigt jedes Element eine Vorschau auf das Bauteil, das dem Arbeitsschritt hinterlegt ist. Zusammen weisen diese Informationen eine tendenziell in horizontaler Richtung ausgedehnte Form auf. Um die Listenelemente möglichst intuitiv und platzsparend darzustellen, ist dementsprechend eine vertikale Liste notwendig. Damit der Ablaufbereich den Visualisierungsbereich möglichst wenig einschränkt, ist er semitransparent, sodass, ähnlich dem peripheren Sehen beim Menschen, ein größerer Überblick möglich ist.

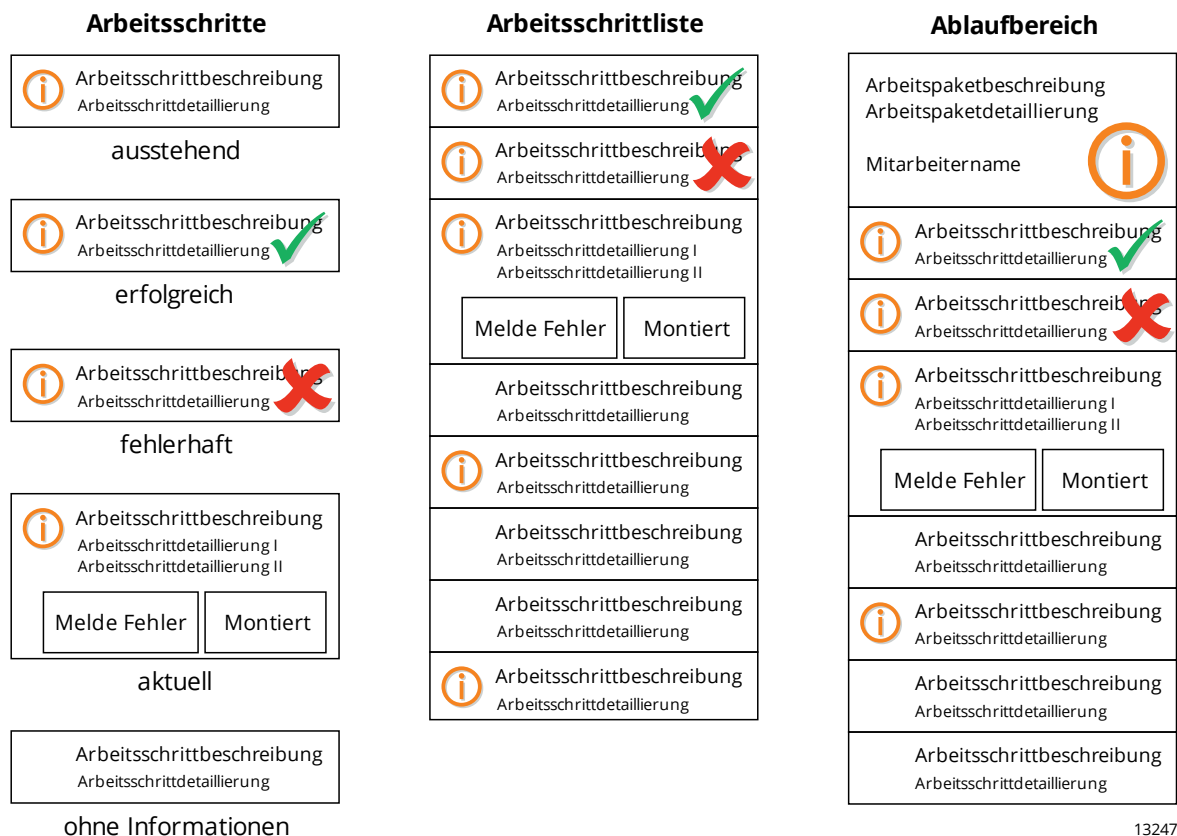


Abbildung 47: Entwicklung der Darstellung der Ablaufsteuerung

Der aktuell ausgewählte Arbeitsschritt enthält zwei weitere Schaltflächen, die das Bestätigen genau dieses Arbeitsschritts bzw. eine Fehlermeldung mit Bezug zum Arbeitsschritt ermöglichen. Hiermit ist zugleich sichergestellt, dass der Nutzer Arbeitsschritte nur dann bestätigen kann, wenn die zugeordneten Informationen (mindestens Klasse I und H) eingeblendet sind. Nach dem Bestätigen springt die Anwendung automatisch in den jeweils nächsten Arbeitsschritt, um Interaktionszeit zu sparen. Zur Unterscheidung sind abgeschlossene Arbeitsschritte mit einem grünen Haken gekennzeichnet; Arbeitsschritte, in

denen der Nutzer einen Fehler gemeldet hat, mit einem roten Kreuz; ausstehende Arbeitsschritte sind ohne Symbol dargestellt. Die Größe der Arbeitsschrittelemente ist dabei so gewählt, dass die Beschriftung einerseits gut lesbar ist, und dass andererseits eine überschaubare Anzahl an Elementen in der Liste Platz findet. Miller schlägt eine Anzahl von sieben („*Plusminus zwei*“) gleichzeitig erfassbaren Informationen vor [Mill56, S. 81ff.]. Die Elemente sind daher so groß, dass die Liste in der typischen Ansicht – ein Arbeitsschritt ist ausgewählt – sieben Einträge darstellt, bei keinem ausgewählten Arbeitsschritt neun.

Die logische Zusammengehörigkeit von Arbeitsschrittbereich und Arbeitspaketbereich legt nahe, die Bereiche auch optisch gemeinsam darzustellen. Da der Arbeitspaketbereich dem Arbeitsschrittbereich logisch übergeordnet ist, befindet er sich darüber.

Der Aufruf von Klasse-S-Informationen erfolgt über ein Informations-Icon. Dieses trägt jeder Arbeitsschritt, dem arbeitsschrittspezifische Informationen zugeordnet sind, sowie der Arbeitspaketbereich für arbeitspaketspezifische Informationen.

Für die Platzierung des Ablaufbereichs auf der Bildschirmfläche geht das folgende Gedankenexperiment von einem rechtshändigen Nutzer aus. Für Linkshänder ergibt sich entsprechend ein seitenverkehrter Aufbau, der im Prototyp aufgrund der Verteilung der Händigkeit nicht umgesetzt ist – drei bis vier Prozent der Menschen gelten als reine Linkshänder, zehn bis 15 Prozent präferieren die linke Hand [Podb12, S. 164].

Es bestehen grundsätzlich zwei Varianten: Der Ablaufbereich befindet sich entweder rechts oder links am Bildschirmrand. Der Bereich erfordert mehrere Arten von Interaktion: Tippen zum Anwählen von Arbeitsschritten und zum Bestätigen oder Melden von Fehlern sowie Wischgesten für den Bildlauf in der Schrittliste. Vor allem erstere folgen Fitts' Gesetz, nach dem die Zeit zum Erreichen einer Zielfläche von deren Distanz und Größe abhängig ist [Fitt54, S. 381ff.]. Kabbash et al. [Kabb93, S. 474ff.] ermittelten, dass rechtshändige Versuchspersonen bei der Eingabe mit einem Touch-Stift mit ihrer linken Hand im Durchschnitt 28 Prozent langsamer und elf Prozent unpräziser waren als mit der rechten. Befindet sich der Ablaufbereich am linken Bildschirmrand, ergeben sich Nachteile:

- Bedient der Nutzer den Ablaufbereich mit seiner linken Hand, ist er weniger schnell und präzise.
- Bedient der Nutzer den Ablaufbereich mit seiner rechten Hand, ist der zurückgelegte Weg länger, worunter nach Fitts' Gesetz die Geschwindigkeit leidet. Zudem verdeckt die Hand bei der Bedienung den Visualisierungsbereich.
- Größere Bedienelemente können zwar den Geschwindigkeits- und Präzisionsnachteil beheben, verringern allerdings die Größe des Visualisierungsbereichs.
- Möchte der Nutzer das Gerät bedienen, während er ein Werkzeug in der – typischerweise rechten – Hand hält, so ist zu erwarten, dass er keine Arbeitsschritte auswählen möchte (vgl. Abschnitt 4.2.1).

eine Information zum aktuell ausgewählten Arbeitsschritt zugeordnet ist, bspw. das Einblenden der Bemaßung. Ein Symbol auf jeder Schaltfläche weist darauf hin, welche Information hinterlegt ist. Ist die Information eingeblendet, ist die Schaltfläche farblich hervorgehoben, liegt keine Information zum aktuellen Arbeitsschritt vor, ist sie ausgegraut. Inhalte bleiben jeweils solange eingeblendet, bis der Benutzer sie wieder deaktiviert. Um die Information auch dann kontinuierlich für den Nutzer anzeigen zu können, wenn diese nicht jedem Arbeitsschritt hinterlegt ist, muss die Schaltfläche auch in einem solchen Fall aktiviert bleiben. Es ergeben sich vier Zustände der Schaltfläche – siehe Abbildung 49.

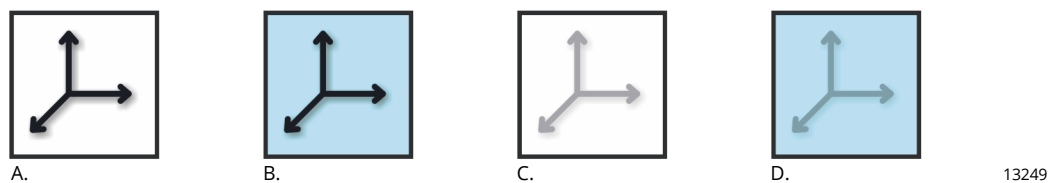


Abbildung 49: Schaltfläche für Inhaltsauswahl für die Information *Bemaßung*:
Information nicht ausgewählt, aber vorhanden (A.); Information ausgewählt (B.);
Information nicht vorhanden (C.); Information (noch) ausgewählt, aber nicht vorhanden (D.)

Da die Inhaltsauswahl auf Klasse-K-Informationen zugreift, ist davon auszugehen, dass Nutzer sie weniger häufig verwenden als die Ablaufsteuerung. Zudem ist es möglich, die Schaltflächen mit einem Abstand zueinander anzuordnen, sodass keine ungewollte Bedienung geschieht, wenn der Nutzer die Schaltfläche verfehlt. Die Inhaltsauswahl befindet sich daher am linken Bildschirmrand, sodass Nutzer sie mit der linken Hand bedienen können. Abbildung 50 zeigt die Benutzeroberfläche mit Inhaltsauswahl.

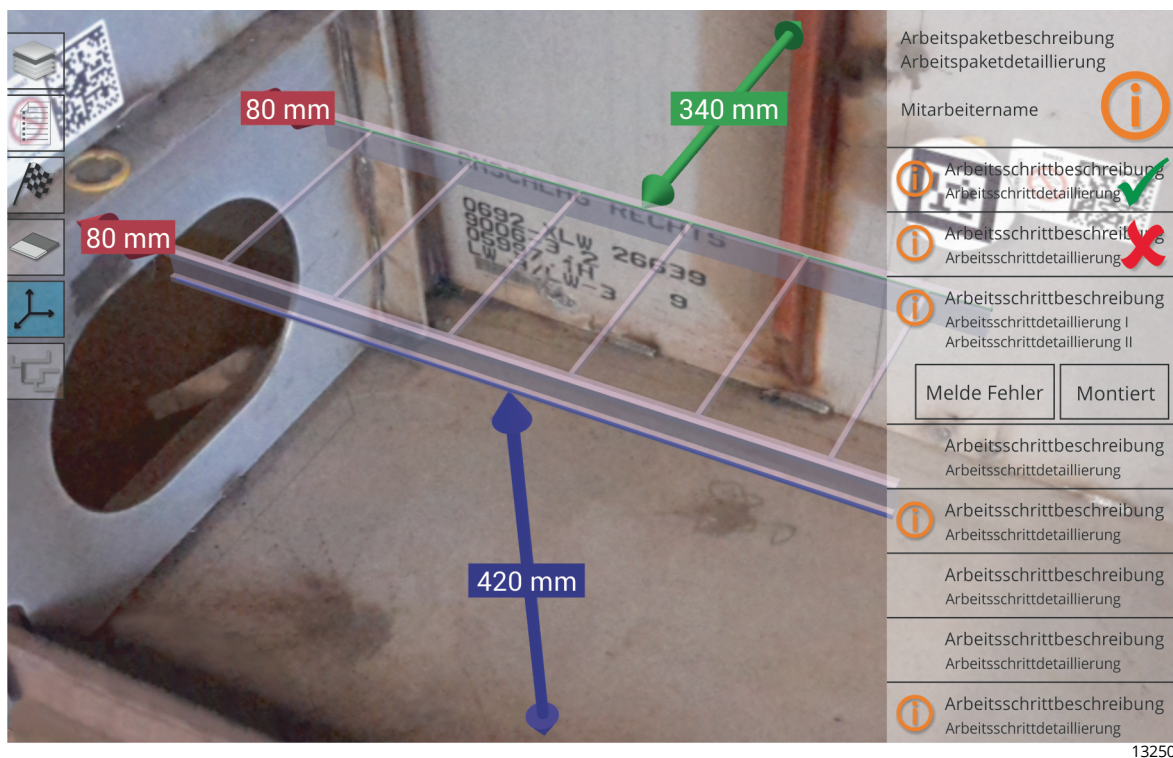


Abbildung 50: Inhaltsauswahl für kontinuierlich genutzte (Klasse-K-)Informationen

Navigationsbereich

Um die dargestellten Inhalte möglichst schnell interpretieren zu können, muss der Nutzer ggf. die Betrachtungsposition einstellen. Im CAD-Modus bestimmt er sie selbst; in AR passt sich die Ausrichtung seiner Betrachtungsposition über das Tracking an, dem er jedoch Anweisungen geben muss. Im CAD-Modus benötigt der Navigationsbereich folgende Eigenschaften:

- Damit der Nutzer direkt Standardansichten (von oben, unten, vorn, hinten, rechts und links) einstellen kann, muss der Navigationsbereich im CAD-Modus Schnellzugriffe hierauf geben.
- Damit der Nutzer direkt die gewünschte Standardansicht wählt, muss die Benutzeroberfläche intuitiv verdeutlichen, welche Ausrichtung des Ansichtsbereichs aus dem jeweiligen Schnellzugriff resultiert.

Im AR-Modus sind für die Steuerung des Trackings folgende Eigenschaften notwendig:

- Hat der Nutzer per Tracking eine geeignete Ansicht eingestellt, möchte er das Gerät ggf. ablegen, ohne dass sich die Ansicht bei fortgeführtem Tracking verstellt. Hierzu muss er das Tracking deaktivieren können – und es später wieder aktivieren können.
- Bei Trackingfehlern oder einem Ortswechsel, muss der Nutzer das Tracking neu starten können.

Um in Reichweite der Hand des Benutzers zu sein und den Visualisierungsbereich möglichst wenig einzuschränken, befindet sich der Navigationsbereich unterhalb der Inhaltsauswahl am linken Bildschirmrand (siehe Abbildung 52). Er enthält im CAD-Modus sechs Schaltflächen, die die Ansicht auf Standardblickrichtungen ausrichten. Zur Verdeutlichung enthalten die Schaltflächen produktbezogene Beschreibungen und Darstellungen der Blickrichtungen (siehe Abbildung 51).

Im AR-Modus besteht der Navigationsbereich – abhängig vom Trackingstatus – aus zwei unterschiedlichen Elementen: Bei aktivem Tracking enthält er eine Schaltfläche zum Festhalten des aktuellen Umgebungsbildes. Aktiviert der Nutzer die Schaltfläche, friert die Anwendung das Tracking ein. Die weitere Funktionalität, i. e. das Einblenden von Informationen, auswählen von Arbeitsschritten etc., steht weiterhin zur Verfügung, findet aber auf dem statischen Bild der Umgebung statt, das der Nutzer ausgewählt und festgehalten hat. Bei inaktivem Tracking zeigt der Navigationsbereich dem Nutzer den jeweils nächsten Schritt, den er zum (Wieder-)Aufbau des Trackings ausführen muss.



Abbildung 51: Schaltflächen des Navigationsbereichs: Standardansichten im CAD-Modus (A.), Festhalten-Schaltfläche im AR-Modus nicht aktiv (B.) bzw. aktiv (C.)

4.3.4 Umschalten der Modi

Da der Nutzer je nach Situation den AR-Modus oder den CAD-Modus nutzen möchte, muss die Anwendung zwischen den Modi hin- und herschalten können. Es wäre möglich, hierfür einen Automatismus anzuwenden (bspw. könnte die Anwendung genau dann in den AR-Modus schalten, wenn das Tracking aktiv ist (i. e. die Pose des Geräts ist bekannt) und andernfalls im CAD-Modus verbleiben. Dies kann jedoch unerwünschte Ergebnisse zur Folge haben, wenn ein Nutzer bei aktivem Tracking im CAD-Modus arbeiten möchte. Er benötigt dementsprechend eine Möglichkeit, den Modus manuell zu wechseln. Der CAD-/AR-Umschalter befindet sich oben rechts im Visualisierungsbereich (siehe Abbildung 52).

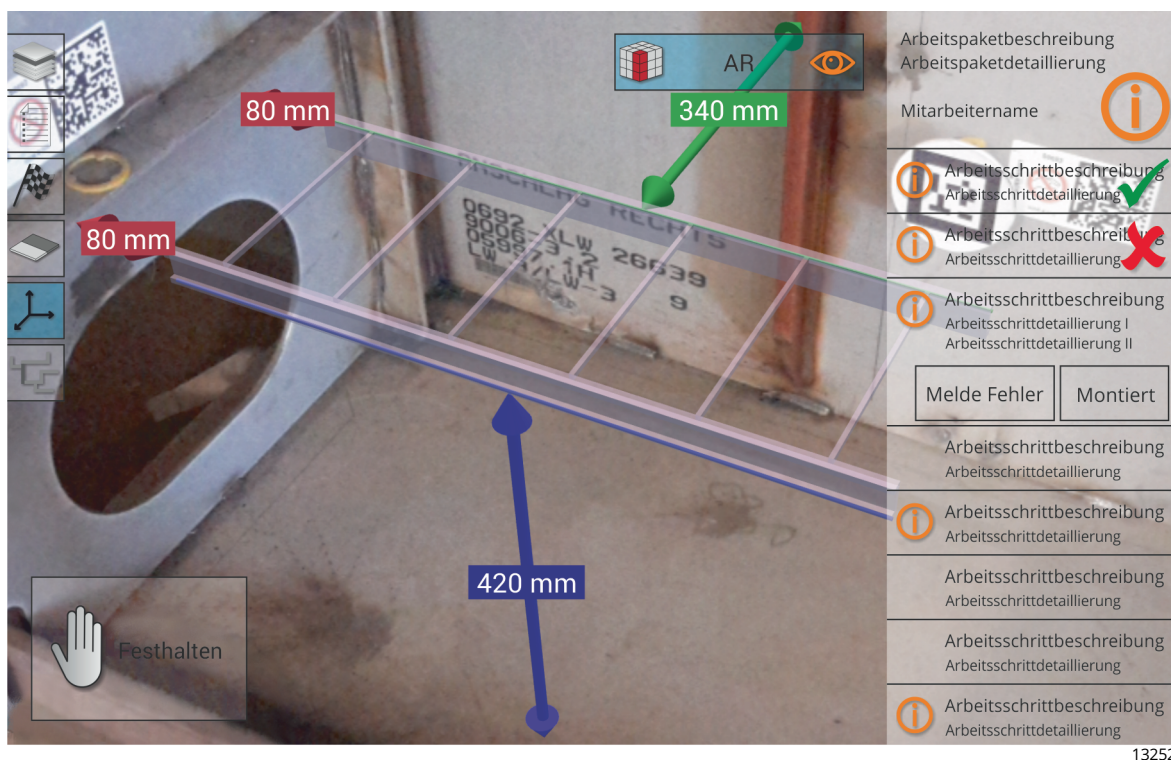


Abbildung 52: Finale Benutzeroberfläche mit Navigationsbereich und CAD-/AR-Umschalter

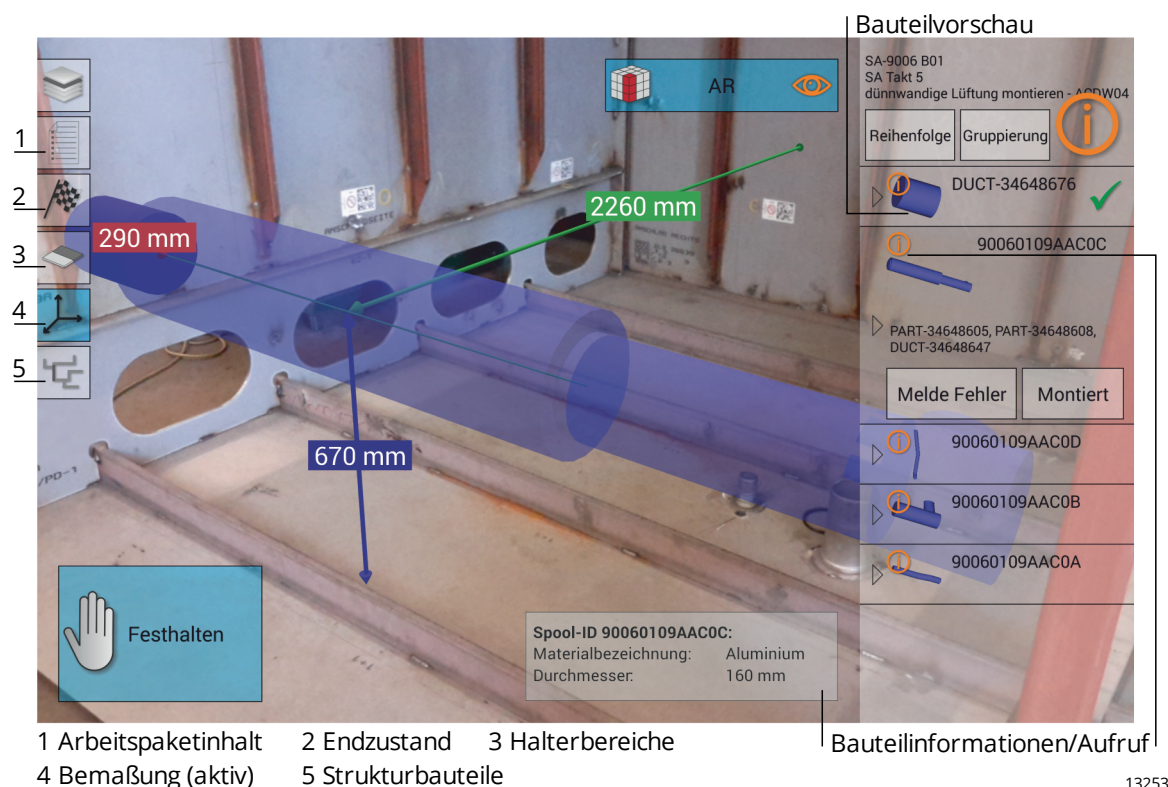
4.3.5 Anwendungsbeispiele

Die Konfigurationen der Oberfläche für die Anwendungsbeispiele Schiffbau und Schaltschrankmontage sind im Folgenden aufgeführt.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: AR-Modus

Abbildung 53 zeigt die für die Sektionsausrüstung konfigurierte Benutzeroberfläche im AR-Modus. Der Mitarbeiter bearbeitet ein Rohrarbeitspaket (Lüftung), in dem er gerade im zweiten Arbeitsschritt ist und das rechts ausgewählte Bauteil montiert. Der Visualisierungsbereich zeigt entsprechend die dazugehörige Bauteilgeometrie als Information der Klasse I an. Als kontinuierliche Information (Klasse K) kann der Nutzer den gesamten Inhalt des aktuellen Arbeitspakets (1) oder den Endzustand (2) nach der Montage aller Bauteile anzeigen lassen oder die bereits montierten Strukturbauteile (Schiffsstahl) für einen Soll-Ist-Abgleich einblenden (5). Die arbeitsschrittbezogenen Informationen Halterbereiche (3) und Bemaßung (4, ausgewählt) sind ebenfalls über die Inhaltsauswahl zuschaltbar.

Bauteilinformationen der Klasse S, im Beispiel die Materialbezeichnung und der Rohrdurchmesser, sind über die Informationsschaltflächen in der Arbeitsschrittliste abrufbar und im Kasten unten rechts dargestellt. Arbeitspaketbezogene Informationen der Klasse S lassen sich über die Informationsschaltfläche oben rechts aufrufen. Um dem Mitarbeiter die Zuordnung der Bauteile zu den anstehenden Arbeitsschritten zu erleichtern, ist zu jedem Arbeitsschritt eine Bauteilvorschau dargestellt.



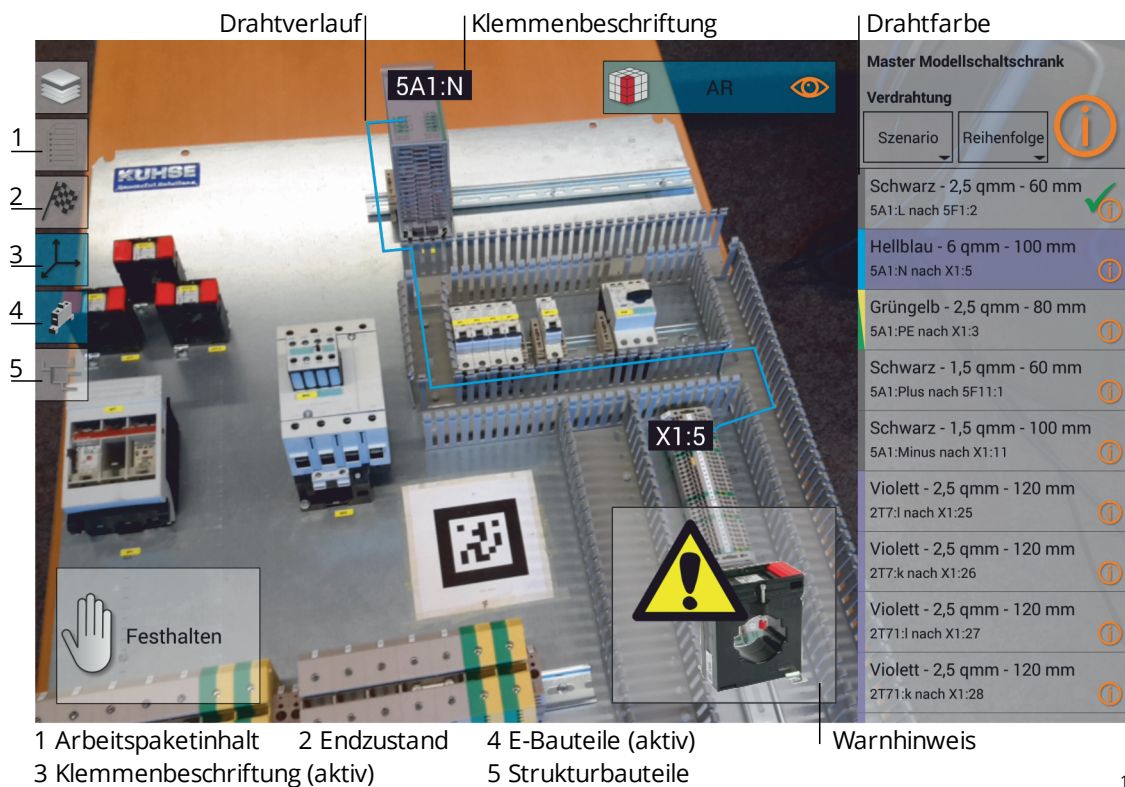
13253

Abbildung 53: Benutzeroberfläche für die Sektionsausrüstung des Schiffbaus im AR-Modus

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: AR-Modus

Die Darstellung der Informationen für die Schaltschrankverdrahtung veranschaulicht Abbildung 54. Der eingefärbte Drahtverlauf ist als Information der Klasse I dargestellt. Über die Inhaltsauswahl lassen sich wiederum Arbeitspaketinhalt (1), Endzustand (2) und Strukturbauteile (5) zuschalten; arbeitsschrittbezogene Inhalte der Klasse K sind die Klemmenbeschriftung (3) und die Geometrie der zu verbindenden Bauteile (4).

Zusätzlich zur Informationsanzeige in der Sektionsausrüstung finden sich hier auch von indirekten Bereichen vorgegebene Hinweise (Klasse H) im Kasten unten rechts. Um dem Nutzer die Identifikation des Drahts zu erleichtern, visualisiert die Anwendung zu jedem Arbeitsschritt die Drahtfarbe.



13254

Abbildung 54: Benutzeroberfläche für die Schaltschrankmontage im AR-Modus

4.3.6 CAD-Modus

Im Vergleich zum AR-Modus weist der CAD-Modus einige Besonderheiten auf. Anstatt die Arbeitsinhalte in das Umgebungsbild einzublenden, zeigt der CAD-Modus sie in einem vollständig virtuellen 3D-Modell an, das auch die Strukturbauteile sowie bereits verbaute Teile enthält. Realität und 3D-Modell stimmen somit überein, was eine schnelle Orientierung im Modell und eine einfache Übertragung der virtuellen Informationen auf die reale Fertigungssituation ermöglicht.

Die Informationsdarstellung und die Steuerung der Inhalte sind dabei für eine konsistente Bedienung der Software analog zu denen im AR-Modus ausgelegt. Beide Modi operieren auf denselben Daten, sodass die vorliegende Montagesituation (Arbeitsschritt, Abarbeitungsgrad, kontinuierliche Informationseinblendungen) beim Umschalten in den jeweils anderen Modus erhalten bleibt. Ein schneller Wechsel zwischen beiden Modi ist damit möglich. Der CAD-Modus erweitert die Anwendungsfälle der digitalen Arbeitsunterlage um folgende Informationstätigkeiten:

- Überblick über die Arbeitsinhalte verschaffen
- Informationen zu Arbeiten mit besonders großen Bauteilen abrufen
- Informationen an anderer Stelle als in der Arbeitsumgebung einsehen

Diese Vorteile gegenüber dem AR-Modus ergeben sich hierbei aus der Entkopplung von Anzeige und Tracking. Die Auswahl der Modellansicht muss folglich auf eine andere effiziente Weise geschehen. Das Konzept sieht hierfür zwei Bedienmöglichkeiten vor, die sich gegenseitig ergänzen: den zuvor beschriebenen diskreten Schnellzugriff auf vordefinierte, häufig genutzte Ansichten sowie kontinuierliche Touch-Gesten zur Translation, Rotation und zum Skalieren des Modells, mit denen der Nutzer dieses in allen sechs Freiheitsgraden ausrichten kann.

Um eine produktive Bedienung in der Fertigungsumgebung zu ermöglichen (Anforderungen P2 und A2), muss der Benutzer sämtliche Gesten mit maximal zwei Fingern derselben Hand ausführen können. Für die Gesten ergeben sich hieraus insgesamt sechs Freiheitsgrade – zwei für Gesten mit einem Finger, vier für Gesten mit zwei Fingern –, die den sechs Freiheitsgraden des 3D-Modells zuzuordnen sind. Für eine möglichst intuitive Steuerung orientiert sich die Zuordnung an bereits aus Consumer-Anwendungen bekannten Gesten und an den Ergebnissen aus Versuchen mit Testpersonen. Die verwendeten Gesten sind in Abbildung 55 dargestellt und im Folgenden erläutert.

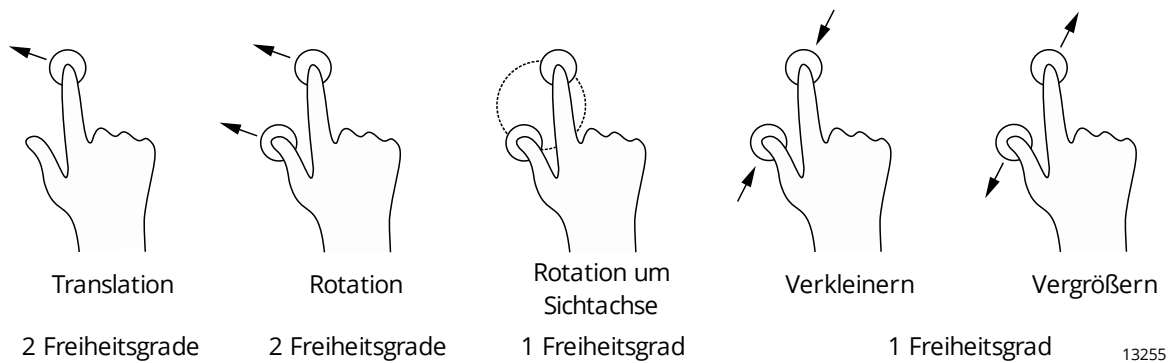


Abbildung 55: Touch-Gesten zur Ausrichtung der 3D-Ansicht

Skalieren (ein Freiheitsgrad)

Aus zahlreichen Smartphone- und Tablet-Anwendungen ist die Zweifinger-Geste zum Skalieren der Ansicht bekannt [Dora11, S. 144ff.]. Der Benutzer setzt hierzu zwei Finger auf den Bildschirm und verändert deren Abstand zueinander. Ein kleinerer Abstand führt zu einer niedrigeren Skalierung, ein größerer Abstand zu einer höheren Skalierung. Die Geste benötigt einen Freiheitsgrad: den Abstand der Finger zueinander.

Rotation (drei Freiheitsgrade)

In Consumer-Anwendungen gilt ein Drehen zweier Fingern um ihren gemeinsamen Mittelpunkt als Drehen einer zweidimensionalen Darstellung. Für die Rotation dreidimensionaler Objekte hat sich bisher keine einheitliche Touch-Geste durchgesetzt, vielmehr gibt es mehrere Möglichkeiten, Rotationen mittels Gesten darzustellen [Dora11, S. 149ff.]. Versuche während der Konzeptentwicklung zeigten, dass eine Mehrheit der Probanden das Bewegen zweier Finger im gleichen Abstand zueinander als Rotationsgeste interpretierte. Die gleiche Geste mit einem Finger, interpretierten zwar auch mehrere Probanden als Rotationsgeste, die sie mit der Bedienung von 3D-CAD-Programmen assoziierten, die Mehrheit sah darin allerdings eine Translationsgeste. Zudem lässt die Geste mit einem Finger nur zwei Freiheitsgrade zu, während für die Rotation drei Freiheitsgrade erforderlich sind. Um ein möglichst konsistentes und intuitives Gestenmodell festzulegen, fiel die Wahl für die Rotation um die Sichtachse auf das Drehen zweier Finger um ihren gemeinsamen Mittelpunkt, für die Rotation um die Achsen innerhalb der Bildebene auf das Bewegen zweier Finger in gleichem Abstand zueinander. Die Bewegungsrichtung der Finger legt hierbei die Drehachse fest; diese liegt senkrecht zu Sichtachse und Bewegungsrichtung. Da die Rotationsgesten nur drei der vier verfügbaren Freiheitsgrade von Gesten mit zwei Fingern benötigen, lassen sie sich parallel zum Skalieren ausführen, was die Bedienung beschleunigt.

Translation (zwei Freiheitsgrade)

Die Translation des Modells parallel zur Bildebene lässt sich intuitiv mit der bereits erwähnten und aus Consumer-Anwendungen bekannten Ziehen-Geste mit einem Finger darstellen [Dora11, S. 136ff.]. Diese benötigt die zwei Freiheitsgrade der Bewegung innerhalb der Bildebene.

Die Navigation im CAD-Modus lässt sich durch eine automatische Einstellung der Ansicht – den Flugmodus – vereinfachen (Abbildung 56, C). Dieses und weitere Werkzeuge, die den Umgang mit der Anwendung beschleunigen, leitet das nachfolgende Kapitel aus den jeweiligen Bedarfen nach produktiver Bedienung her.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: CAD-Modus

Abbildung 56 zeigt die digitale Arbeitsunterlage für die Sektionsausrüstung im CAD-Modus. Es liegt die gleiche Montagesituation wie in Abbildung 53 vor. Anstelle des Kamerabildes sind die Bauteile in das CAD-Modell des Stahls eingeblendet. Im Navigationsbereich ersetzen die Standardansichten die Festhalten-Schaltfläche.

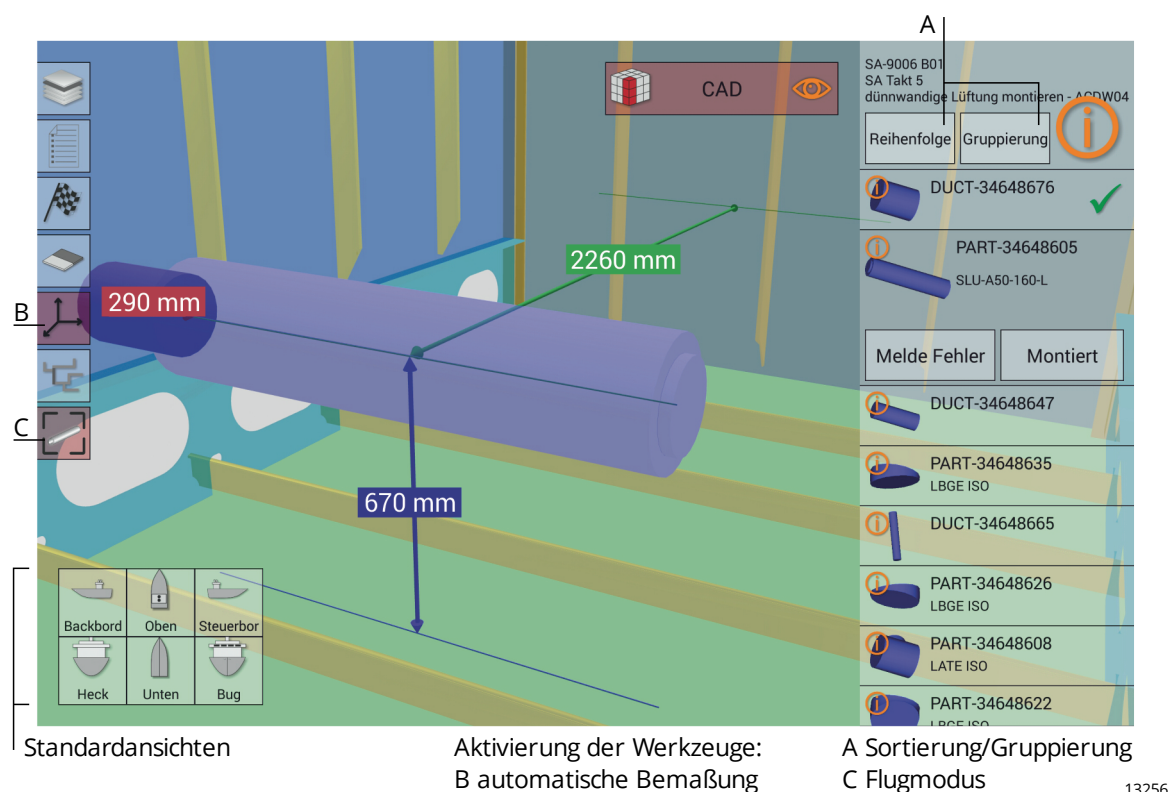


Abbildung 56: Benutzeroberfläche für die Sektionsausrüstung des Schiffbaus im CAD-Modus

4.4 Werkzeuge

Um einen produktiven Einsatz der digitalen Arbeitsunterlage sowohl in den indirekten als auch in den direkten Bereichen (Anforderungen P1 bzw. P2) zu ermöglichen, erweitern Werkzeuge die Grundfunktionalität der Anwendung. Die Werkzeuge dienen dazu, Mitarbeitern der indirekten Bereiche die Datenaufbereitung zu vereinfachen, ggf. sogar abzunehmen, oder dazu, dem Fertigungsmitarbeiter die Informationserfassung und/oder -interpretation zu erleichtern. Werkzeuge sollten dann zum Einsatz kommen, wenn sich eine Aufbereitung von Daten in eine möglichst intuitiv verständliche Darstellungsform automatisieren lässt, und eine manuelle Aufbereitung seitens der indirekten Bereiche nicht lohnenswert ist (vgl. dazu auch Abbildung 42).

Da sich die Bedürfnisse, die über die Grundfunktionalität einer mobilen, arbeitsschrittgerechten Datenanzeige hinausgehen, von Unternehmen zu Unternehmen unterscheiden, sind die Werkzeuge als Add-ins aufgebaut und erweitern je nach Anwendungsfall den Funktionsumfang der digitalen Arbeitsunterlage. Das Add-in-Prinzip soll dabei verhindern, dass die zusätzlichen Funktionalitäten die Anwendung und insbesondere die Oberfläche überfrachten, oder die Software eine Insellösung für einen speziellen Anwendungsfall darstellt.

Aus letzterem Grund sind die Werkzeuge auch in die digitale Arbeitsunterlage integriert. Eine Lösung, die der Bereitstellung der Daten auf dem Server vorgeschaltet ist und die Daten im Vorwege aufbereitet, wäre zwar denkbar, allerdings müsste diese unterschiedliche Datenformate berücksichtigen, um auf weitere Anwendungsfälle übertragbar zu sein. Zudem müssen einige Werkzeuge die Daten situationsspezifisch aufbereiten, also in Abhängigkeit von den vorangegangenen Interaktionen des Mitarbeiters mit der Anwendung. Würde die Aufbereitung bereits auf dem Server stattfinden, müssten die Werkzeuge alle prinzipiell möglichen Situationen vorhersehen und erheblich mehr Daten aufbereiten, als der Mitarbeiter tatsächlich nutzt, oder die Aufbereitung der Daten auf ein hinsichtlich der Rechenzeit akzeptables Maß beschränken und hierbei in Kauf nehmen, dass dies die Flexibilität des Mitarbeiters im Umgang mit der digitalen Arbeitsunterlage einschränkt. Nicht zuletzt besitzen die mobilen Endgeräte eine Rechenleistung, die der von kostengünstigen Servern nahekommt. Eine automatische Datenaufbereitung im Vorwege ist letztlich in zwei Fällen vorzuziehen:

- Es existiert bereits Software, die Datenaufbereitungsfunktionen anbietet, die das Unternehmen bisher nicht nutzt (bspw. ein Add-in für das zum Einsatz kommende CAD-Programm).
- Die Datenaufbereitung ist derart rechenintensiv, dass eine Ausführung auf dem mobilen Endgerät die Produktivität einschränkt, sei es aufgrund von Wartezeiten für den Mitarbeiter oder verminderter Akkulaufzeit, die ein Nachladen während der Arbeit erforderlich macht.

In den übrigen Fällen ist die Aufbereitung auf dem mobilen Endgerät vorzuziehen. Dies gilt für alle in den folgenden Abschnitten vorgestellten Werkzeuge. Die Anwendungsbeispiele verdeutlichen jeweils, in welchen Fällen die Werkzeuge zum Einsatz kommen können. Business-Process-Model-and-Notation-Diagramme (BPMN-Diagramme) veranschaulichen jeweils die Abläufe der Werkzeuge.

4.4.1 Automatische Bemaßung

Da viele Bauteile in der Unikatfertigung nicht auf Passung gefertigt sind, müssen Mitarbeiter sie oft in allen sechs Freiheitsgraden im Raum ausrichten. Hierzu benötigen sie die sogenannte Bemaßung zu bereits montierten Referenzbauteilen. Fertigungsmitarbeiter müssen die Bemaßung bisher entweder selbst in den Unterlagen (oder ggf. einem CAD-Modell) ausmessen, oder ein Mitarbeiter der indirekten Bereiche hat sie dort bereits vermerkt. In beiden Fällen entsteht manueller Aufwand. Ein Bemaßungswerkzeug, das die für den Mitarbeiter relevanten Maße automatisch berechnet und sie ihm arbeitsschrittspezifisch für AR aufbereitet, würde den Aufwand der indirekten und/oder der direkten Bereiche senken und maßgeblich zur Produktivitätssteigerung beitragen.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Bemaßung

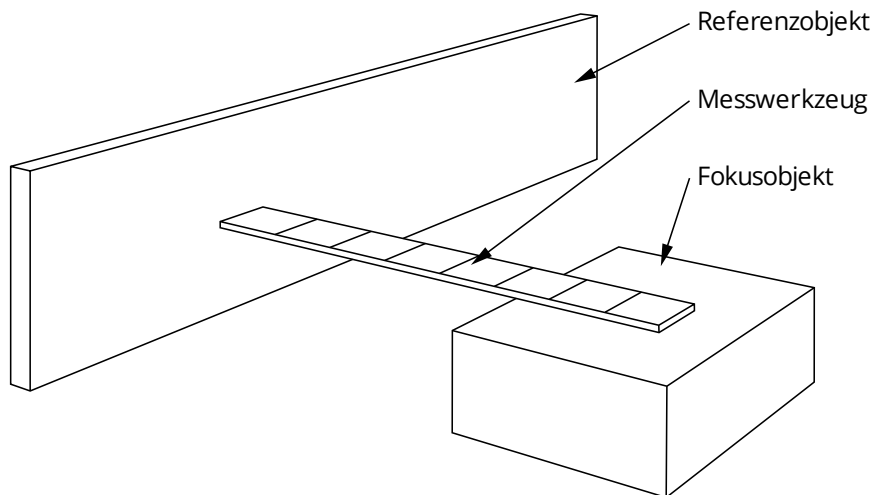
Für die Montage eines Rohrstranges auf einer Schiffssektion benötigt der Mitarbeiter Maßangaben zur Stahlstruktur der Sektion: die Höhe des Rohres über dem Boden, sowie die Entfernungen zu nächstgelegenen Spantenrahmen oder Wänden. Er kann die Bemaßung über drei mögliche Wege beziehen: Entweder misst er sie selbst aus (bei Papierzeichnungen mit einem Maßstabslineal, bei 3D-Arbeitsunterlagen mit einem 3D-Messwerkzeug), oder ein Mitarbeiter der indirekten Bereiche erzeugt sie manuell im CAD-Programm. In allen drei Fällen entsteht entweder für die indirekten Bereiche oder für den Fertigungsmitarbeiter Aufwand.

Das Werkzeug *automatische Bemaßung* [Dikh16, S. 10ff.] macht sich zunutze, dass das Messen ein im Wesentlichen vorhersehbarer Vorgang ist. Mitarbeiter Maßangaben, die

- sich auf die Bauteile des aktuellen Arbeitsschritts beziehen,
- zu fest installierten, als Referenz geeigneten Bauteilen angegeben sind und
- sich in der Realität einfach (bspw. mit einem Gliedermaßstab) ausmessen lassen.

Aus diesen drei Forderungen ergeben sich unmittelbar die notwendigen Eingabegrößen für das Werkzeug: aktuelle Bauteile, Referenzbauteile und Messparameter, die beschreiben, auf welche Weise der Mitarbeiter misst. Die aktuellen Bauteile sind aufgrund der Situationsbewusstheit der digitalen Arbeitsunterlage bekannt, die Referenzbauteile müssen indirekte Bereiche im Vorwege festlegen – dies ist bei systematischer Bauteilbenennung allerdings automatisierbar –, und die Messparameter sind ein einmalig zu konfigurierendes Merkmal des Bemaßungswerkzeugs.

Abbildung 57 zeigt abstrahiert die beim Messen vorliegende Situation: Der Mitarbeiter gleicht mit einem Messwerkzeug eine Distanz (unter mehreren) zwischen einem festen Referenzobjekt und dem von ihm zu verbauenden Fokusobjekt ab, um dieses im Raum in seinen sechs Freiheitsgraden auszurichten.



13257

Abbildung 57: Definition der Bezeichnungen für die automatische Bemaßung

Integration in den Prozess

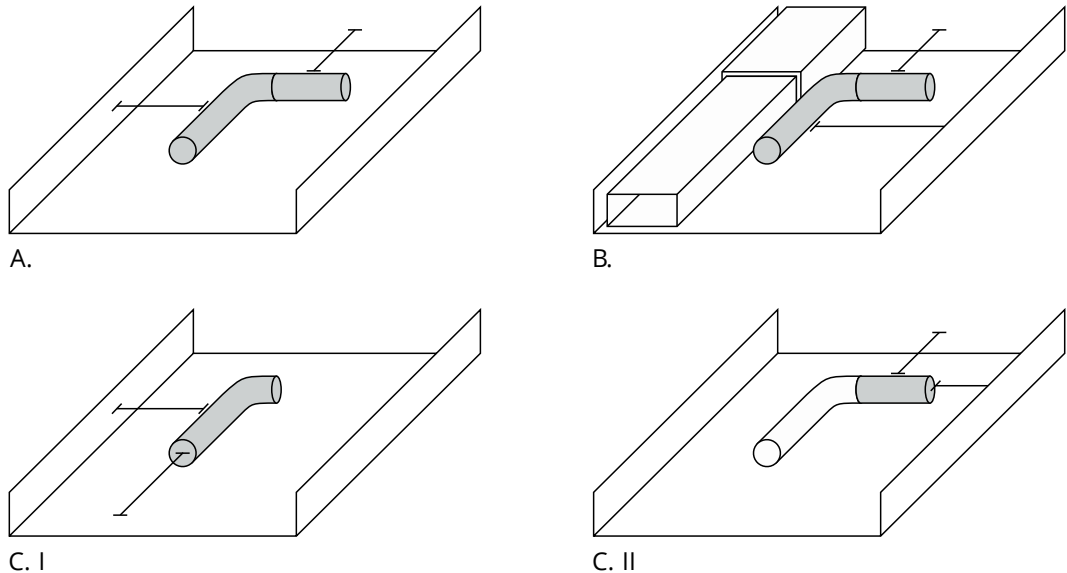
Zunächst ist die Frage zu klären, an welcher Stelle im Prozess das Werkzeug zum Einsatz kommen muss. Möglich sind zwei Extrema sowie einige Abstufungen dazwischen:

- Das Bemaßungswerkzeug könnte alle benötigten Maße a priori berechnen (bspw. auf dem Datenserver), sodass sie auf den Endgeräten als statische Zusatzinformationen zur Verfügung stehen, oder
- das Bemaßungswerkzeug befindet sich auf dem Endgerät selbst und berechnet die Bemaßung ad hoc, also nur und genau dann, wenn der Mitarbeiter sie anfordert.

Für die erste Variante spricht, dass die Rechenzeit für die Maßeherzeugung, die eine Verzögerung der Arbeit zur Folge haben könnte, ausschließt. Demgegenüber stehen Einbußen in der Flexibilität: Entscheidet sich der Mitarbeiter, Teile zunächst vorzumontieren und anschließend als Gruppe einzubauen, benötigt er ggf. andere Maße, als würde er die Teile einzeln montieren. Zudem sind je nach Fertigungssituation – die sich in den indirekten Bereichen allerdings nur bei einer sehr detaillierten Planung vorhersagen lässt – unterschiedliche Maße für den Mitarbeiter hilfreich. Das folgende Anwendungsbeispiel soll beide Fälle verdeutlichen.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: dynamische Bemaßung

Abbildung 58 verdeutlicht die Notwendigkeit dynamisch berechneter Bemaßung. Während im Fall A der Messweg nach links günstiger ist, hat der Mitarbeiter im Fall B zuvor bereits ein anderes Rohr eingebaut, das den Messweg versperrt, sodass es für ihn einfacher ist, nach rechts zu messen. Im Fall C montiert der Mitarbeiter die Rohrbauteile nicht wie in den Fällen A und B als Baugruppe auf der Sektion, sondern einzeln. Alle drei Fälle erfordern daher unterschiedliche Bemaßungen.



13258

Abbildung 58: Bemaßung bei unterschiedlicher Arbeitsweise und Reihenfolge

Zudem ist es möglich, dass Bauteile im Zuge ihrer Montage zu Referenzbauteilen werden. Eine A-priori-Berechnung der Bemaßung müsste demzufolge entweder alle möglichen Verbaureihenfolgen und Vormontagekombinationen berücksichtigen oder könnte nicht gewährleisten, dass sie dem Mitarbeiter eine für seine Situation geeignete Bemaßung bereitstellt. Bei flexiblen Arbeitsprozessen, wie sie in der Unikatfertigung vorzufinden sind, ist deshalb eine dynamische Berechnung der Maße auf den Endgeräten zu wählen, sofern sie eine geringe Rechenzeit aufweist, die den Arbeitsprozess des Mitarbeiters nicht aufhält. Zudem sind die Folgen im Fall einer für den Mitarbeiter ungeeigneten Bemaßung wesentlich höher, wenn sich diese nur a priori berechnen lässt. Er müsste in diesem Fall die Quelle der Information aufsuchen und eine neue Bemaßung anfordern. Bei einer Ad-hoc-Variante wäre es möglich, sofort eine alternative Bemaßung berechnen zu lassen.

Funktionsweise der automatischen Bemaßung

Für die Verwendung des automatischen Bemaßungswerkzeugs muss die Grundannahme erfüllt sein, dass die 3D-Modelle in CAD auf Basis typischer Primitive (dreidimensionaler Grundformen) konstruiert sind. An jedem der Primitive lässt sich das Messwerkzeug auf unterschiedliche Weise anlegen und ausrichten. Das Messwerkzeug misst dabei in eine Raumrichtung, also auf einer Geraden. Referenzobjekte ermöglichen es ebenfalls, auf einer Geraden in eine Raumrichtung zu messen. Das Ziel des Algorithmus ist es entsprechend,

Geraden zu bestimmen, die sich sowohl an den Referenzobjekten als auch am Fokusobjekt messen lassen und die zusammen die sechs Freiheitsgrade des Fokusobjekts festlegen. Abbildung 59 gibt einen Überblick über den Ablauf des Algorithmus und führt die BPMN-Notation ein.

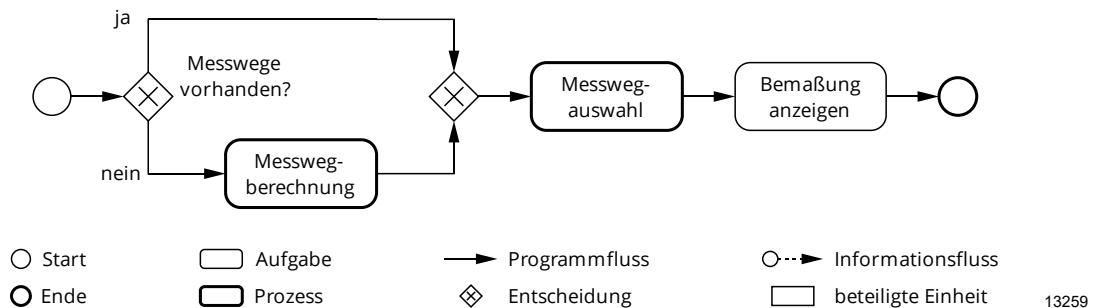


Abbildung 59: Überblick über die Berechnung und Anzeige der Bemaßung

Die Berechnung möglicher Messwege sowie die Auswahl geeigneter Messwege sind im Folgenden beschrieben. Hierbei ist zu beachten, dass die Messwegberechnung für ein gegebenes Bauteil (oder eine Gruppe von Bauteilen) nur einmalig stattfinden muss. Benötigt der Benutzer später erneut eine Bemaßung für das Bauteil, so greift der Algorithmus auf die bereits berechneten Messwege zurück, bewertet diese aber anhand der veränderten Montagesituation neu.

Messwegberechnung

Ziel der Messwegberechnung ist, eine Menge an prinzipiell möglichen Messwegen zu erstellen. Der Ablauf ist in Abbildung 60 dargestellt.

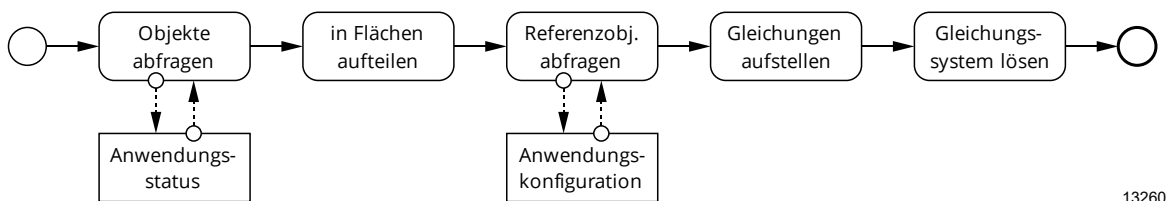


Abbildung 60: Ablauf der Berechnung möglicher Messwege

Zunächst teilt der Algorithmus das ausgewählte Bauteil (oder die ausgewählte Baugruppe) in die kleinsten Bestandteile auf, die CAD-Primitive, dargestellt in Abbildung 61. Es entsteht eine Menge von Primitiven, die der Algorithmus fortan einzeln betrachtet. Die Primitive bestehen jeweils aus Flächen, an denen sich das Messwerkzeug auf unterschiedliche Weise anlegen lässt: eckige, ebene Flächen (in der Abbildung dunkelgrau), runde, ebene Flächen (mittelgrau), zylindrische Flächen (hellgrau) und sphärische Flächen (weiß).

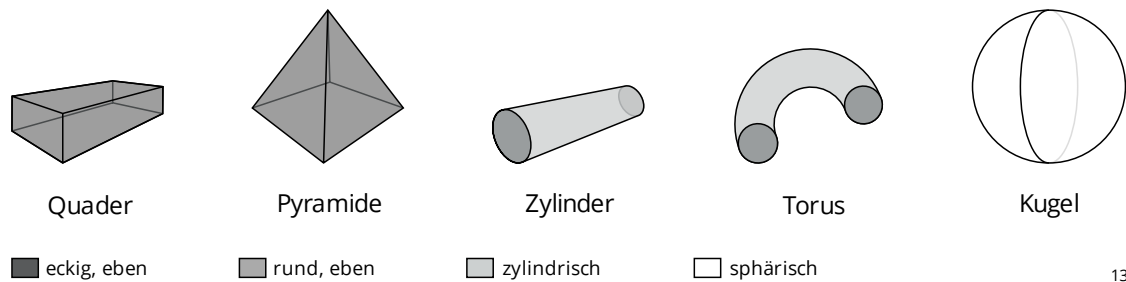


Abbildung 61: Für die Bemaßung verwendete CAD-Primitive

Um das zu lösende Problem – das Finden von messbaren Geraden auf den Flächen der Primitive – weiter auf Teilprobleme herunterzubrechen, teilt der Algorithmus die Primitive in ihre einzelnen Flächen auf und betrachtet diese von hieran separat. Die Flächen, die aus den Primitiven entstehen, sind in Abbildung 62 dargestellt.

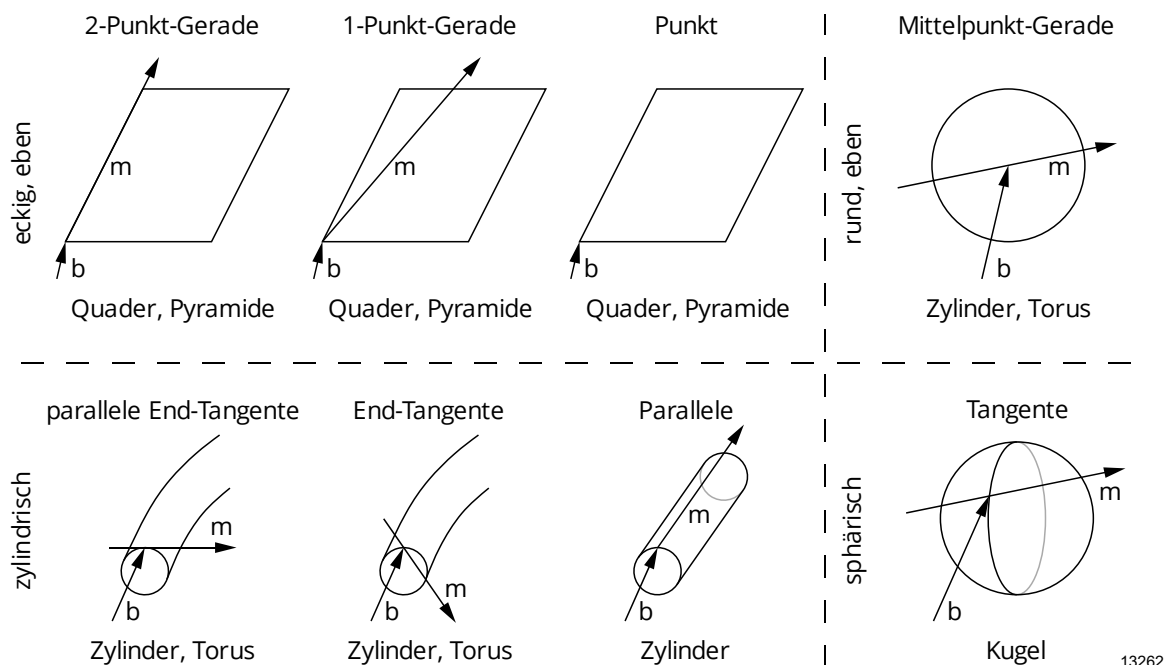


Abbildung 62: Flächentypen der Primitive mit Messrichtung m und Stützpunkt b

Die Flächen bieten unterschiedliche Möglichkeiten, das Messwerkzeug anzulegen und auszurichten. Eckige Flächen, die aus Quadern und Pyramiden entstehen, erlauben ein Anlegen und Ausrichten des Messwerkzeugs

- an zweien ihrer Ecken (im Bild: 2-Punkt-Gerade),
- an einer der Ecken parallel zur Oberfläche (1-Punkt-Gerade) oder
- an einer Ecke (Punkt).

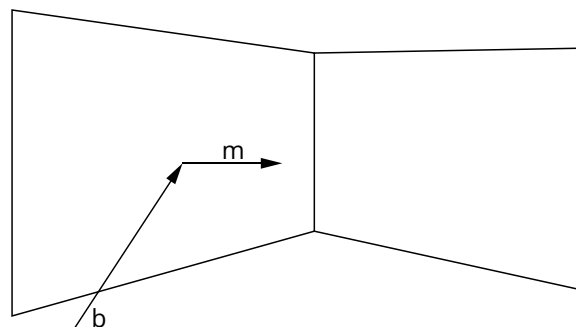
An den runden, ebenen Endflächen von Zylinder und Torus lässt sich das Messwerkzeug in beliebiger Richtung auf der Oberfläche anlegen und so ausrichten, dass es den Mittelpunkt der Kreisfläche schneidet (Mittelpunkt-Gerade).

An den gekrümmten Außenflächen ergeben sich drei Möglichkeiten, das Messwerkzeug anzulegen und auszurichten:

- an einer Tangente des Kreisrandes und parallel zur Kreisebene (Parallel-Tangente),
- an einer beliebigen Tangente des Kreisrandes oder
- bei Zylindern an einer Gerade auf der Außenfläche.

An der sphärischen Außenfläche einer Kugel lässt sich das Messwerkzeug entlang einer beliebigen Tangente anlegen.

Für jede der gefundenen Geraden, die als potenzieller Messweg zu einem Fokusobjekt in Frage kommen, ist nun festzustellen, ob es ein Referenzobjekt gibt, zu dem sich diese Gerade messen lässt. Dafür sind ebenfalls für jedes Messobjekt die Geraden aufzustellen, die sich zu ihm messen lassen. Auf welche Weise sich an einem Referenzobjekt messen lässt, obliegt dem Unternehmen und dem konkreten Anwendungsfall. Theoretisch lassen sich Referenzobjekte genauso behandeln wie Fokusobjekte. In der Praxis hat sich allerdings gezeigt, dass Mitarbeiter anders zu den Referenzobjekten messen als zu den Fokusobjekten. Eine bedeutsame Rolle kommt hierbei großen, ebenen Flächen zu – Wänden und Böden: Mitarbeiter messen häufig orthogonal zu ihnen. Die Flächen stellen also Geraden entlang ihrer Normalenrichtung zur Verfügung (Abbildung 63).



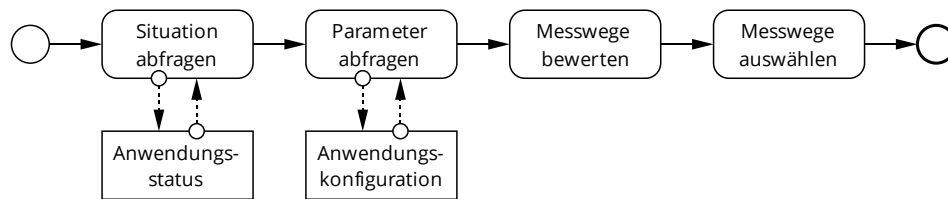
13263

Abbildung 63: Messrichtungen, die eine Fläche zur Verfügung stellt, beschrieben durch Stützpunkt b und Richtungsvektor m

Das Ziel des nächsten Schritts ist es, solche Geraden zu finden, die sich sowohl an einem Fokusobjekt als auch an einem Referenzobjekt ausmessen lassen. Hierzu löst der Algorithmus pro gefundener Gerade(-nschaar) am Fokusobjekt und gefundener Gerade(-nschaar) an allen Referenzobjekten in Reichweite des Messwerkzeugs (bspw. zwei Meter) ein lineares Gleichungssystem.

Messwegauswahl

Das Ziel der Messwegauswahl ist es, aus den prinzipiell möglichen Messwegen solche auszuwählen, die für die aktuelle Montagesituation geeignet sind. Abbildung 64 gibt einen Überblick.



13264

Abbildung 64: Ablauf der Auswahl geeigneter Messwege

Für jede berechnete Lösung, i. e. jeden gefundenen Messweg, bestimmt ein Bewertungsalgorithmus Parameter, um die Güte der Messstrecke abzuschätzen. Die Gewichtung der Parameter sowie die Bewertungsstrategie pro Parameter sind konfigurierbar und lassen sich somit auf Unternehmensspezifika anpassen. Zu den Parametern gehören

- die Anzahl der eingeschränkten rotatorischen Freiheitsgrade,
- die Genauigkeit des Messwerkzeugs für die Messung,
- die Erreichbarkeit des Messwegs und
- die Blockadefreiheit des Messwegs.

Schränkt ein Messweg möglichst viele rotatorische Freiheitsgrade des Fokusobjekts ein, ist er besonders geeignet. Eine 2-Punkt-Gerade legt bspw. zwei rotatorische Freiheitsgrade fest, während eine Punkt-Messung die rotatorischen Freiheitsgrade nicht reduziert.

Die Toleranz des Messwerkzeugs kann von der gemessenen Strecke abhängen. Ein Gliedermaßstab ist bspw. bei Messung kürzerer Distanzen genauer als bei längeren. Entsprechend bewertet der Algorithmus kurze Distanzen als geeigneter.

Ob ein Messweg geeignet ist, hängt ebenfalls davon ab, ob die Mitarbeiter ihn ergonomisch erreichen können. Der Algorithmus bewertet Messwege in Arbeitshöhe deshalb besser als solche, die sich über Kopfhöhe der Mitarbeiter befinden.

Versperren Gegenstände den Messweg, ist die Messung umständlicher und ggf. weniger genau als bei freier Sichtlinie zwischen Referenz- und Fokusobjekt. Freie Messwege erhalten deshalb die höchste Bewertung, gefolgt von solchen, die lediglich zwischen den Endpunkten blockiert sind. Messwege, deren Endpunkte blockiert sind, bewertet der Algorithmus als ungeeignet. Hiermit lassen sich alle Messwege ausschließen, die an einem innenliegenden Primitiv des Fokusobjekts beginnen.

Für die abschließende Auswahl der Menge anzuzeigender Messwege zieht der Algorithmus deren Rangfolge heran: Er fügt der Menge – beginnend mit dem bestbewerteten – solange weitere Messwege hinzu, bis Rotation und Translation des Fokusobjekts vollständig bestimmt sind. Messwege, die keine weiteren Freiheitsgrade festlegen, überspringt er hierbei.

Sollte sich die ausgewählte Bemaßung für den Mitarbeiter als ungeeignet herausstellen, hat er die Möglichkeit, einzelne Messwege abzulehnen. Der Algorithmus berechnet daraufhin eine alternative Bemaßung unter Ausschluss des abgelehnten Messwegs.

4.4.2 Reihenfolgebildung

Die Forderung nach einer optimalen Informationsmenge bedingt eine Einteilung der Arbeitspakete in einzelne Schritte. Diese sind in der Regel auf triviale Weise durch die Menge der enthaltenen Bauteile gegeben. Für einen effizienten Ablauf, d. h. ein Weiterschalten zum jeweils nächsten Arbeitsschritt, sind darüber hinaus Reihenfolgeinformationen erforderlich. Während eine Detailplanung der Arbeitsschritte und Reihenfolgen in der Serienfertigung etabliert ist, findet in der Unikatfertigung nur eine wesentlich gröbere Planung statt, typischerweise eine Reihenfolgebildung auf Arbeitspaket-, nicht aber auf Arbeitsschritzebene. Eine detaillierte Planung würde damit einen erheblichen Zusatzaufwand für die indirekten Bereiche zur Folge haben. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte bestimmt letztlich der Fertigungsmitarbeiter am Ort der Wertschöpfung. In der digitalen Arbeitsunterlage würde dies einem händischen Sortieren der Arbeitsschrittliste entsprechen und ineffizient sein. Um den Zusatzaufwand in indirekten Bereichen zu eliminieren und in direkten Bereichen zu minimieren, soll ein Werkzeug den Mitarbeiter bei der Reihenfolgeplanung vor Ort unterstützen und die Arbeitsschrittliste reihenfolgegerecht aufbereiten.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: geometrische Reihenfolgen

Ein Mitarbeiter montiert in seinem Arbeitspaket einen mehrere Meter langen Rohrstrang auf einer Sektion. Hierzu benötigt er eine Einteilung des Arbeitspakets in Arbeitsschritte (die einzelnen Bauteile des Rohrstranges) und eine Reihenfolge, die seiner Arbeitsweise gerecht wird. Befragungen der Fertigungsmitarbeiter ergaben, dass sie die Einbaureihenfolge meist selbst festlegten – auf Basis von Erfahrungswissen sowie persönlicher, bauteilabhängiger und situativer Präferenzen (bspw. gleichzeitig stattfindende Arbeiten auf der Sektion). So begannen die Mitarbeiter in der Regel an einer Wanddurchführung eines Rohres und arbeiteten sich entlang des Rohrstranges vor, in anderen Fällen starteten die Mitarbeiter bewusst an einer Stelle, an der zu dem Zeitpunkt keine anderen Arbeiten stattfanden.

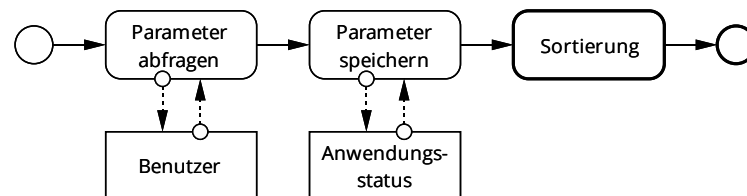
Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: parameterbasierte Reihenfolgen

Bei der Verdrahtung von Schaltschränken setzt sich das Arbeitspaket aus einer Menge vorkonfektionierter Drähte unterschiedlicher Längen, Farben und Querschnitte zusammen. Jeder Arbeitsschritt entspricht der Installation eines Drahts. Die Mitarbeiter gaben an, dass die Reihenfolge der Verdrahtungsschritte sekundär sei, die Arbeit sich durch eine systematische Vorgehensweise aber vereinfachen lasse. Die Mitarbeiter bevorzugten es, zunächst alle Drähte gleicher Farbe, gleichen Querschnitts oder gleicher Länge zu installieren, um die Materialbeschaffung zu erleichtern. Alternativ installierten sie zunächst alle vom selben elektronischen Bauteil ausgehenden Drähte, um sich seltener neu im Schaltschrank orientieren zu müssen. Die zweite Variante war auch bei Verwendung konventioneller Papierunterlagen die übliche Vorgehensweise.

Das Werkzeug *Reihenfolgebildung* macht sich zunutze, dass die Planung von Arbeitsschrittreihenfolgen meist auf Basis vorzugebender Parameter stattfindet. Solche Parameter können entweder geometrischer Natur sein (Rohrstrang von links nach rechts einbauen) oder sich auf Metadaten beziehen (Drähte nach Farbe sortieren). Die Funktionsweise ist im Folgenden beschrieben.

Funktionsweise der Reihenfolgebildung

Die Reihenfolgebildung setzt sich aus zwei Teilen zusammen: der Nutzereingabe zur Vorgabe der Sortierparameter und dem Algorithmus zum Sortieren der Arbeitsschritte. Der Ablauf ist in Abbildung 65 dargestellt. Die Nutzereingabe ist einmalig erforderlich, die Sortierung kann wiederholt erfolgen. Hierzu speichert der Algorithmus die aktuell ausgewählten Sortierparameter im Anwendungsstatus.



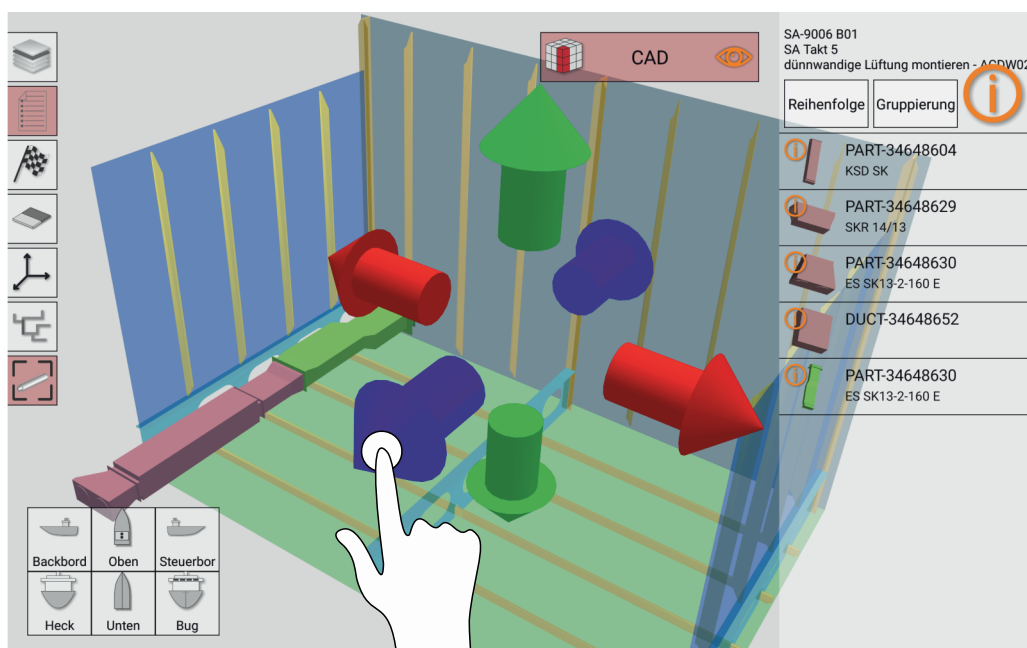
13265

Abbildung 65: Ablauf der Auswahl der Sortierparameter

Der Nutzer initiiert die Reihenfolgebildung, indem er die Schaltfläche *Reihenfolge* berührt und angibt, ob er geometrisch oder anhand von Metadaten sortieren möchte. Die darauf folgende Nutzereingabe der Sortierparameter orientiert sich an der Designrichtlinie aus Abschnitt 4.2.2. Sie ist so gestaltet, dass möglichst wenig Übertragungsleistung für den Nutzer bei der Auswahl der Sortierparameter entsteht. Geometrische Parameter wählt der Mitarbeiter in einer geometrischen Darstellung aus, Metadaten aus einer Parameterliste.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: geometrische Sortierungsauswahl

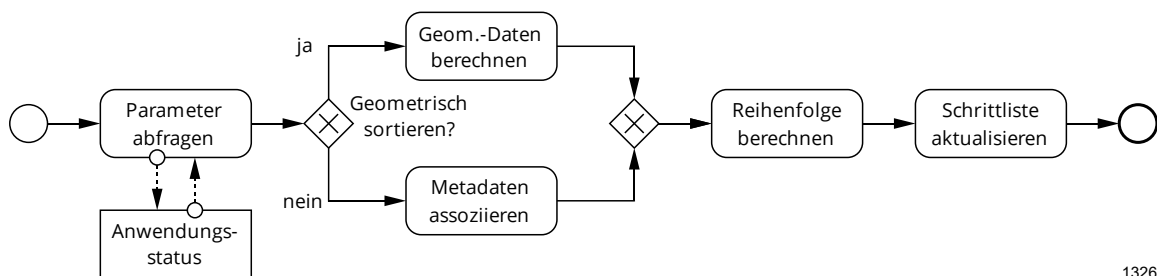
Abbildung 66 verdeutlicht die Auswahlmethode für die geometrische Sortierung: der Mitarbeiter wählt eine Verbaurechtung für den Rohrstrang aus. Die Einblendung der Auswahl erfolgt in Form von Richtungspfeilen direkt im Modell, sodass der Zusammenhang zwischen der Richtungsauswahl (hier: in Richtung der positiven Y-Achse) und dem Sortierergebnis eindeutig und intuitiv ist.



13266

Abbildung 66: Geometrische Reihenfolgebildung

Abbildung 67 zeigt den Ablauf der anschließenden Sortierung. Wählt der Benutzer einen geometrischen Sortierparameter, berechnet das Werkzeug diesen für jeden Schritt des Arbeitspakets. Im Beispiel der Sortierung nach der Position entlang der Y-Achse ist dies der Mittelpunkt des zum Arbeitsschritt gehörenden Bauteils. Wählt der Benutzer einen Metadaten-Parameter, ermittelt das Werkzeug die zum Parameter gehörende Metadaten-Bezeichnung, deren bauteilspezifischen Wert sie für die Sortierung verwendet.



13267

Abbildung 67: Ablauf der Sortierung

Im Anschluss an die Sortierung aktualisiert die Benutzeroberfläche die Arbeitsschrittliste. Die Sortierung anhand von Metadaten ist weitgehend allgemeingültig. Eine Ausnahme bilden lediglich Sonderfälle wie eine Sortierung nach Materialart, bei der etwa Kupfer vor Aluminium, aber nach Stahl kommt. Hierfür ist es notwendig, den Sortieralgorithmus mit einer Materialrangfolge zu versorgen. Die geometrische Reihenfolgebildung erfordert für andere Sortierparameter dagegen grundsätzlich zusätzlichen Anpassungsaufwand. Soll die Reihenfolge bspw. in einer großen Arbeitsumgebung die zurückzulegenden Wege zwischen den Bauteilen optimieren, ist ein neuer Sortieralgorithmus zu schreiben.

4.4.3 Arbeitsschrittgruppierung

Analog zur Reihenfolgeplanung entsteht durch die Zuordnung der Informationen zu Arbeitsschritten für komplexere Arbeitspakete mit vielen Einzelschritten der Bedarf, den Arbeitsinhalt zu strukturieren. Hierbei entstehen Arbeitsschrittgruppen, die jeweils Unterarbeitsschritte enthalten. Eine solche Strukturierung ließe sich zwar theoretisch auch durch geschickte Sortierung der Arbeitsschritte erreichen, dies würde jedoch zulasten der Übersichtlichkeit der Arbeitsschrittliste gehen. Die folgenden Anwendungsbeispiele verdeutlichen die Notwendigkeit einer Arbeitsschrittgruppierung.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Baugruppen

Einige Bauteile erreichen die Sektionsausrüstung bereits in einem vormontierten Zustand, als Baugruppe. In den Fertigungsdaten des Unternehmens ist dies lediglich an einem Metadatum zu erkennen, das bei allen Bauteilen der Gruppe gleich ist. Der Mitarbeiter muss folglich nicht alle Einzelteile auf der Sektion montieren, sondern befestigt in einem einzigen Arbeitsschritt die gesamte Baugruppe. Um dies auch einfach handhabbar in der Arbeitsschrittliste abbilden zu können, ist es erforderlich, die Bauteile auf Basis des Metadatums zu Baugruppen zusammenzufassen und als Einzelschritt darzustellen.

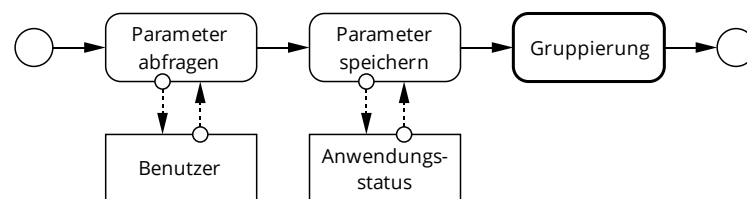
Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Materialbeschaffung

Die Mitarbeiter der Schaltschrankmontage müssen die elektronischen Bauteile zunächst von unterschiedlichen Orten beschaffen: Manche Bauteile sind direkt am Arbeitsplatz vorrätig, andere in einem von mehreren Lägern. Während sich für die Montage der Bauteile eine Sortierung nach Drahtfarbe, Länge und Querschnitt am besten eignet, ist es für die Beschaffung der Bauteile sinnvoll, diese nach Lagerort zu Gruppen zusammenzufassen und innerhalb der Gruppen nach ihrer Teilenummer zu sortieren.

Die Beispiele zeigen, dass eine statische Arbeitsschrittliste nicht statisch ist, sondern dass sie die Arbeitsinhalte je nach Situation dynamisch darstellen muss. Eine Gruppierung nach Parametern, die der Mitarbeiter nach Bedarf festlegt, ist ein hierfür geeignetes Werkzeug. Wie bereits bei der Reihenfolgebildung beschrieben, lässt sich auch die *Arbeitsschrittgruppierung* anhand der vorhandenen Metadaten realisieren.

Funktionsweise der Arbeitsschrittgruppierung

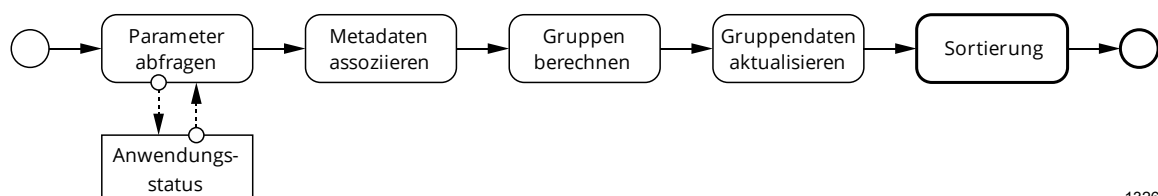
Die Arbeitsschrittgruppierung besteht ebenfalls aus einer Nutzereingabe und einem Gruppierungsalgorithmus. Abbildung 68 stellt den Ablauf der Nutzereingabe schematisch dar. Der Nutzer gibt, wie auch bei der Reihenfolgebildung, einen Parameter (i. e. ein Metadatum) vor, nach dem die Gruppierung erfolgt. Im Anschluss berechnet das Werkzeug die Gruppierungen (Abbildung 69).



13268

Abbildung 68: Ablauf der Arbeitsschrittgruppierung

Hierzu assoziiert es Werte der Metadaten und fasst Arbeitsschritte mit gleichem Metadatum (bspw. gleichem Lagerort oder gleicher Baugruppen-ID) zu sogenannten *virtuellen Arbeitsschritten* zusammen. Das Werkzeug stößt abschließend die Neusortierung der Arbeitsschritte bei der Reihenfolgebildung an. Jeder virtuelle Arbeitsschritt bildet nun eine Gruppe von Arbeitsschritten mit gleichem Metadatum ab.



13269

Abbildung 69: Ablauf der Berechnung der Gruppierung

Ein Mitarbeiter kann die enthaltenen Teilschritte nun gesammelt bearbeiten, indem er den virtuellen Arbeitsschritt auswählt. In diesem Fall zeigt die Anwendung ihm die kumulierten

Informationen an – im Anwendungsbeispiel Schiffbau würde bspw. das Bemaßungswerkzeug alle enthaltenen Bauteile betrachten und Maßangaben für die Baugruppe berechnen und darstellen. Alternativ kann ein Mitarbeiter die enthaltenen Teilschritte einzeln auswählen und bearbeiten.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Baugruppen

Abbildung 70 zeigt das Resultat der parameterbasierten Arbeitsschrittgruppierung: virtuelle Arbeitsschritte, die Baugruppen aus mehreren Einzelteilen repräsentieren.

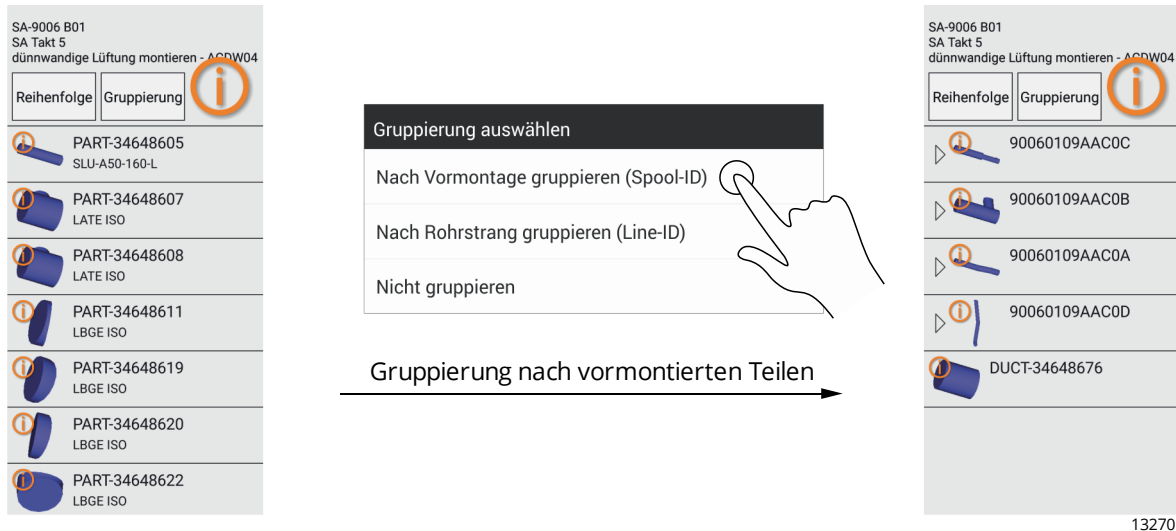


Abbildung 70: Parameterbasierte Arbeitsschrittgruppierung und virtuelle Arbeitsschritte

Planungstemplates

Die vorgestellten Sortierungs- und Gruppierungswerkzeuge erfordern jeweils manuelle Eingaben des Benutzers. In zwei Situationen sind die manuellen Eingaben unproduktiv:

- Sortierung und/oder Gruppierung sind sehr kompliziert, sodass der Mitarbeiter ein komplexes Schema eingeben muss, oder
- Sortierung und/oder Gruppierung sind vorhersehbar, sodass der Mitarbeiter wiederholt die gleiche Eingabe machen muss.

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Planungstemplates

Wie das vorherige Beispiel zeigt, sind für den Mitarbeiter je nach Aktivität unterschiedliche Gruppierungen hilfreich. Bei der Beschaffung der Teile aus dem Lager sind diese in Gruppen nach ihrem Lagerort zusammengefasst. Die Anordnung der Teile im Lager unterscheidet sich jedoch in den Lagerorten. Im ersten Lager sind die Bauteile nach Teilenummern angeordnet, im zweiten nach dem Material. Um dem Mitarbeiter in beiden Lägern eine systematische Kommissionierung zu ermöglichen, müssten die beiden Gruppen nach unterschiedlichen Parametern sortiert sein.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Rohrarbeitspakete

Für die meisten Rohrarbeitspakete (bspw. Lüftungsrohre) liefert das Unternehmen die Rohre zu Baugruppen vormontiert am Montageort an. Mitarbeiter gruppieren die Arbeitsinhalte folglich grundsätzlich nach der Vormontagegruppe der Rohrbauteile.

Um die Mitarbeiter von unnötigen Eingaben zu entlasten, ist ein Hilfsmittel notwendig, das

1. komplexe Gruppierungen und Sortierungen vorkonfiguriert speichert, sodass diese schnell abrufbar sind, und
2. eine automatische Erkennung der geeigneten Gruppierung und Sortierung ermöglicht.

Planungstemplates decken beide Forderungen ab und schaffen eine Struktur, die Planungsparameter (Gruppierungs- und Sortierparameter) beschreibt und vorgibt, wann diese anzuwenden sind. Ein Planungstemplate besteht aus:

- dem Namen des Templates für seine eindeutige Identifikation,
- Gruppierungs- und Sortierparametern (zusammen Planungsparameter), die jede mögliche – ggf. auch geschachtelte – Kombination aus Gruppen und Sortierungen abbilden können, und
- optional einem regulären Ausdruck, der Arbeitspaketnamen beschreibt, für die das Template anzuwenden ist.

Im ersten Beispiel ergibt sich ein Template für die Montage und eines für die Materialbeschaffung. Im zweiten Beispiel ergibt sich ein Template, das nach der Vormontagegruppe der Rohrbauteile gruppiert und aktiv wird, wenn der Arbeitspaketname dem hinterlegten regulären Ausdruck genügt.

Eine von den indirekten Bereichen (oder einem IT-Verantwortlichen) anzulegende Konfigurationsdatei (XML-Format) enthält alle voreingestellten Planungstemplates für den Anwendungsfall. Ruft der Fertigungsmitarbeiter ein Arbeitspaket ab, findet ein Vergleich zwischen dessen Namen und den regulären Ausdrücken aller Planungstemplates in der Konfigurationsdatei statt. Bei einer Übereinstimmung gelten die im Planungstemplate festgelegten Planungsparameter, anhand derer die Werkzeuge Arbeitsschrittgruppierung und Reihenfolgebildung die Arbeitsschrittliste anlegen. Eignen sich mehrere Planungstemplates, liegt die Wahl beim Nutzer.

4.4.4 Automatische Ausrichtung der Ansicht

Die Ausrichtung der Ansicht im CAD-Modus erfordert vom Fertigungsmitarbeiter eine oder mehrere Interaktionen mit der Anwendung. Das Ziel der Interaktion ist in einigen Situationen vorhersehbar: Wählt der Mitarbeiter einen neuen Arbeitsschritt, so wird er in aller

Regel als nächstes die CAD-Ansicht auf dessen geometrische Informationen – zumeist Bauteile – ausrichten. Eine solche Ansicht könnte ein Mitarbeiter der indirekten Bereiche zwar vorbereiten, dies wäre jedoch nur eine Umverteilung von Aufwand. Ein Werkzeug, das dem Mitarbeiter eine geeignete Ansicht im richtigen Moment automatisch einstellt – ein sogenannter *Flugmodus* –, kann in diesem Fall Interaktionsschritte reduzieren. Wie das Anwendungsbeispiel zeigt, hat ein solches Werkzeug vor allem in großen Umgebungen weitere Vorteile.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Orientierung

Der Inhalt eines Arbeitspakets in der Sektionsausrüstung erstreckt sich auf eine Fläche von bis zu 300 m². Muss ein Mitarbeiter Bauteile an mehreren separaten Orten auf der Sektion installieren, ist die nächste Bauteilposition – im Gegensatz zum Einbau eines Rohrverlaufs – nicht immer offensichtlich. Die Suche nach dem nächsten Bauteil im CAD-Modus kostet den Mitarbeiter Zeit, die sich einsparen lässt, wenn die digitale Arbeitsunterlage den Mitarbeiter bei der Orientierung unterstützt.

Funktionsweise des Flugmodus

Das Werkzeug *Flugmodus* macht sich zunutze, dass die wesentlichen Randbedingungen feststehen, unter denen der Mitarbeiter die CAD-Ansicht ausrichten möchte. Sie setzen sich zum einen zusammen aus Informationen, die in der digitalen Arbeitsunterlage aufgrund der Situationsbewusstheit vorliegen. Dies sind

- die aktuelle Ansicht im CAD-Modus,
- der Zeitpunkt des Arbeitsschrittwechsels,
- die Position, Ausrichtung und Größe der relevanten geometrischen Informationen.

Zum anderen gibt es Informationen, die zu konfigurieren sind: die Charakteristika einer realistischen Betrachtungsposition für den Anwendungsfall. Diese bestehen aus

- rotatorischen Einschränkungen, im Beispiel: keine Rotation um die Blickachse,
- translatorischen Einschränkungen, im Beispiel: auf Augenhöhe (1,70 m) über dem Boden, und
- objektbezogenen Einschränkungen, im Beispiel: Alle objektspezifischen 3D-Informationen (bspw. 3D-Modell, Bemaßungspfeile) sollen vollständig sichtbar sein; um den Überblick zu wahren, soll das Objekt mindestens 1,50 m entfernt sein.

Um den Mitarbeiter bei der Orientierung zu unterstützen, zeigt das Werkzeug nicht direkt die neue Betrachtungsposition an, sondern überführt die vorherige Ansicht mit einer Fluganimation in die neue Ansicht, sodass der Mitarbeiter die Relativposition einschätzen kann. Der Ablauf der Berechnung und Ausführung der Fluganimation zur neuen Betrachtungsposition ist in Abbildung 71 schematisch dargestellt.



Anwendungsbeispiel Schiffbau: Flugmodus



Die Fluganimation ist nicht in allen Anwendungsfällen sinnvoll. Im Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage, ist die Arbeitsumgebung so klein, dass sie den Bildschirmbereich kaum überschreitet. Erst bei größeren Zoomstufen, die ein Mitarbeiter für sehr kleine Bauteile benötigen könnte, besteht die Gefahr, dass er den Überblick verliert, sodass der Flugmodus Vorteile bringen würde. Das Einsatzfeld beschränkt sich dadurch auf Anwendungsfälle, in denen der Mitarbeiter Ansichten *im* Modell auswählt, anstatt es *von außen* zu betrachten.

4.5 Trackingbaukasten

Ziel des Trackings ist es, für das Einblenden der Informationen in AR eine Übereinstimmung zwischen den Koordinatensystemen der realen Umgebung und des virtuellen Modells zu erreichen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Für einen produktiven Einsatz ist es erforderlich, dass diese Übereinstimmung möglichst schnell zustande kommt. Dies ist vor allem in großen, veränderlichen Umgebungen schwierig, da die Trackingalgorithmen genaue bekannte und wiedererkennbare Merkmale zur Berechnung der Pose benötigen. Künstliche Merkmale wie Marker führen zwar zu präzisen Abschätzungen der Pose, eignen sich jedoch aufgrund der geringen Reichweite nicht, um größere Umgebungen abzudecken, sofern sie nicht in großer Anzahl installiert sind. Dies ist in Szenarien, in denen die Marker über einen längeren Zeitraum Anwendung finden, akzeptabel. Für die Unikatproduktion zeigt jedoch folgendes Rechenbeispiel aus dem Schiffbau, dass eine Lösung ausschließlich über künstliche Merkmale in mittleren und größeren Produktionsumgebungen nicht akzeptabel ist, da sie einen erheblichen Mehraufwand in der Vorbereitung verursacht (vgl. Anforderung P1):

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Markertracking

Aus jeder Montageposition auf den bis zu 900 m² großen Schiffssektionen müsste mindestens ein künstliches Merkmal sichtbar sein. Unter der Annahme, dass sich die Merkmale aus maximal eineinhalb Metern Entfernung erkennen lassen, deckt ein Merkmal etwa sieben Quadratmeter ab. In Summe ergäben sich pro Sektion mindestens (d. h. bei optimaler Positionierung) 128 Merkmale, deren Anbringen und Vermessen den Vorbereitungsaufwand deutlich erhöhen würden. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass Montagetätigkeiten wie Schweißen oder Konservieren die künstlichen Merkmale unbrauchbar machen oder deren Positionen verändern.

Verfahren, die auf natürlichen Merkmalen beruhen, haben in der Regel den Nachteil, keine eindeutige Initialpose zu liefern. Bislang ist damit kein Trackingverfahren bekannt, das sowohl eine genaue Initialisierung als auch eine stabile kontinuierliche Berechnung der Pose über längere Strecken mit einem produktiven Einsatz kombiniert. Weil manche Verfahren jeweils eines der Probleme lösen, liegt es nahe, das Tracking in Teilprobleme aufzuteilen und für deren Lösung auf unterschiedliche Trackingverfahren zurückzugreifen. Der vorgestellte Trackingbaukasten nutzt hierfür folgende Teilschritte (vgl. [Hala14b, S. 493ff.]):

1. Grobinitialisierung (Abschnitt 4.5.3)
2. Feininitialisierung (Abschnitt 4.5.2)
3. kontinuierliches Tracking (Abschnitt 4.5.1)

Abbildung 73 beschreibt den Aufbau des Trackingbaukastens. Für die drei Schritte stehen jeweils Alternativen zur Auswahl. Im Prototyp findet bspw. die Grobinitialisierung über QR-Codes statt, die Feininitialisierung über ein optisches Markertracking und das kontinuierliche Tracking über Umgebungsfeatures, also natürliche Merkmale. Es bleibt dennoch unbenommen, dass ein Trackingverfahren zwei der Teilschritte abdecken kann, oder in bestimmten Anwendungsfällen Teilschritte verzichtbar sind. Ist z. B. der Bereich, in dem das Tracking stattfinden soll, so überschaubar, dass eine künstliche Markierung überall sichtbar ist, besteht keine Notwendigkeit, ein zusätzliches kontinuierliches Tracking einzusetzen.

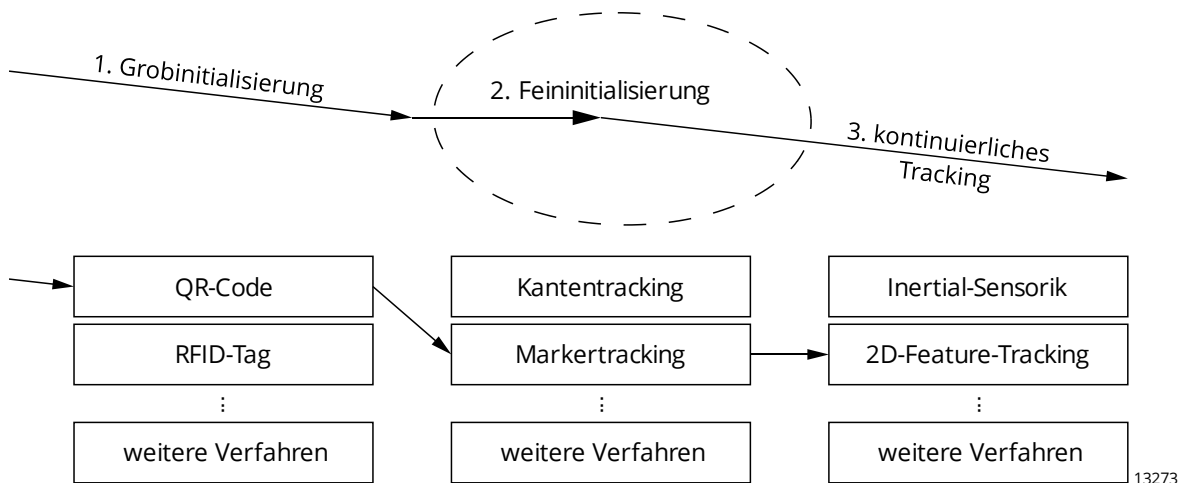


Abbildung 73: Aufbau und Funktionsweise des Trackingbaukastens

Die folgenden drei Abschnitte erklären die Funktionsweise und das Zusammenwirken der Teilschritte des Trackingbaukastens. Die Reihenfolge ist dabei bewusst umgekehrt und startet mit dem kontinuierlichen Tracking, da die beiden ersten Teilschritte Informationen für ihr jeweiliges Nachfolger-Verfahren bereitstellen. Zweck und Nutzen dieser Informationen ergeben sich jedoch erst, wenn die Funktionsweise des Nachfolger-Verfahrens bekannt ist.

4.5.1 Kontinuierliches Tracking

Ziel des kontinuierlichen Trackings ist es, dem Mitarbeiter einen möglichst großen Bewegungsradius zu bieten, in dem er die virtuellen Informationen in die Realität eingeblendet sieht. Da eine lückenlose Abdeckung großer, veränderlicher Umgebungen mit künstlichen Merkmalen den Vorbereitungsaufwand erheblich steigern würde, muss eine lückenlose Posenberechnung idealerweise über natürliche Merkmale stattfinden. Hierzu eignen sich die folgenden inkrementelle Trackingverfahren:

- Bildfeature-basierte Trackingverfahren
- Tracking von Struktur-Features mit 3D-Kameras
- Tracking auf Basis von Inertialsensoren
- eine Kombination der Verfahren zur Erhöhung der Genauigkeit

Allen Verfahren sind zwei Nachteile gemeinsam. Einerseits nimmt Genauigkeit der Pose mit der zurückgelegten Entfernung ab. Daher muss eine Reinitialisierung möglich sein. Hierfür stellt der Trackingbalken eine Funktion bereit, mit der der Benutzer das Tracking neu starten kann – wahlweise im Schritt der Grobinitialisierung oder der Feininitialisierung. Andererseits ist die Startpose für das kontinuierliche Tracking unbekannt, da es (vor allem aufgrund der Veränderung der Umgebung) nicht möglich ist, die Positionen der natürlichen Merkmale im Vorwege zu kennen. Es ist daher notwendig, dem Trackingverfahren die Startpose mitzuteilen. Dies geschieht durch die Feininitialisierung.

4.5.2 Feininitialisierung

Ziel der Feininitialisierung ist es, eine genaue anfängliche Pose für das Tracking festzulegen und das Koordinatensystem des virtuellen Modells in allen sechs Freiheitsgraden am Koordinatensystem des zu fertigenden Produkts auszurichten. Hierzu eignen sich sowohl künstliche als auch natürliche Merkmale wie bspw.:

- optische 2D-Marker
- ein Kantenmodell der Umgebung

Beide Verfahren liefern eine hinreichend genaue Startpose, benötigen allerdings weitere Informationen, um ein korrektes Endergebnis zu erzeugen.

Künstliche Marker

Bei der Verwendung künstlicher Marker müssen die Gestalt (Größe, ggf. eine Identifikationsnummer) sowie die Position und Ausrichtung der Marker (Pose) im Modell- und im Realkoordinatensystem bekannt sein. Hierzu eignen sich drei Verfahren; Abbildung 74 zeigt jeweils ein Anwendungsbeispiel:

- a) Die Marker sind mit dem Werkstück verbunden (z. B. aufgedruckt oder verklebt) und eindeutig, sodass sich bspw. über eine Tabelle eine direkte Zuordnung zwischen dem Marker und dessen Pose treffen lässt. Der Installations- und Materialaufwand für die Marker steigt bei diesem Verfahren mit der Größe des abzudeckenden Bereiches. Zudem gehen die Marker bei einer etwaigen Konservierung oder Lackierung des Produkts verloren. Ein Einmessen oder präzises Anbringen der Marker an vordefinierten Positionen ist erforderlich.
- b) Es gibt ausgemessene künstliche Vorzugspositionen wie bspw. Zentrierringe auf dem Werkstück, an denen ein spezieller Marker über eine Passung einrastet. Statt

eines Markers pro Position ist ein Marker pro Mitarbeiter erforderlich, sodass sich der Materialaufwand im Vergleich zu Variante a) verringert. Die Vorzugspositionen bleiben auch bei weiterer Behandlung des Produkts (bspw. Lackierung, Konservierung) erhalten. Ein Einmessen oder präzises Anbringen der künstlichen Vorzugspositionen ist weiterhin erforderlich. Da die Marker nicht bestimmten Positionen zugeordnet sind, muss der Mitarbeiter die verwendete Vorzugsposition zunächst auswählen.

- c) Bei regelmäßigen Strukturen wie bspw. Spantenrahmen ergibt sich eine Vielzahl natürlicher Vorzugspositionen, an denen ein spezieller Marker über eine Passung einrastet. Hierdurch entfallen sowohl das Einmessen als auch das präzise Ausrichten des Markers. Auch die natürlichen Vorzugspositionen bleiben bei weiterer Behandlung erhalten. Mitarbeiter müssen die verwendete Vorzugsposition ebenfalls auswählen.

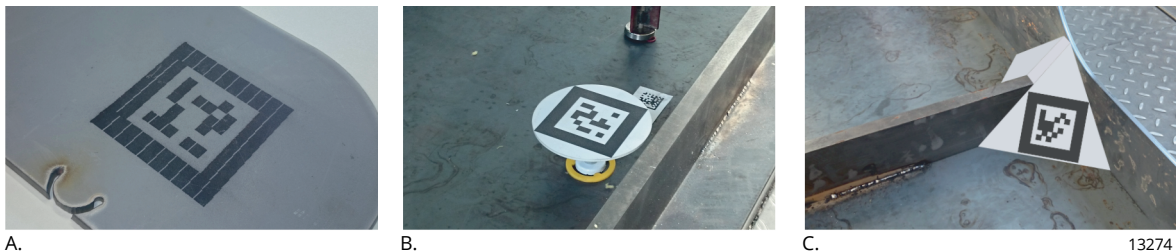


Abbildung 74: Beispiele für verbundene Marker (A.), Marker an künstlichen (B., vgl. [Mosk16, S. 96]) bzw. natürlichen Vorzugspositionen (C.)

Kantenmodelle

Im Fall eines Kantenmodells muss bei der Verwendung vorhandener Algorithmen (bspw. [Enge13]) eine annähernde Startpose bekannt sein, aus der der Anwender auf das Modell blickt. Zudem ergeben sich bei regelmäßigen Strukturen, wie bspw. Spantenrahmen oder Regalen, meist mehrere mögliche Posen. Abbildung 75 veranschaulicht diese Problematik. Das zur Initialisierung verwendete Kamerabild sieht aus mehreren Posen (P1 und P2) ähnlich aus. Diese Mehrdeutigkeit kann zur Folge haben, dass das Tracking falsch initialisiert und der Mitarbeiter alle Bauteile um ein Spantenmaß versetzt einbaut.

Die Feininitialisierung über Kantenmodelle benötigt daher im Voraus eine annähernde Pose, um das Tracking eindeutig zu initialisieren. Diese annähernde Pose verkleinert zudem den Suchraum für den Kantenabgleich, sodass eine schnellere Initialisierung möglich ist.

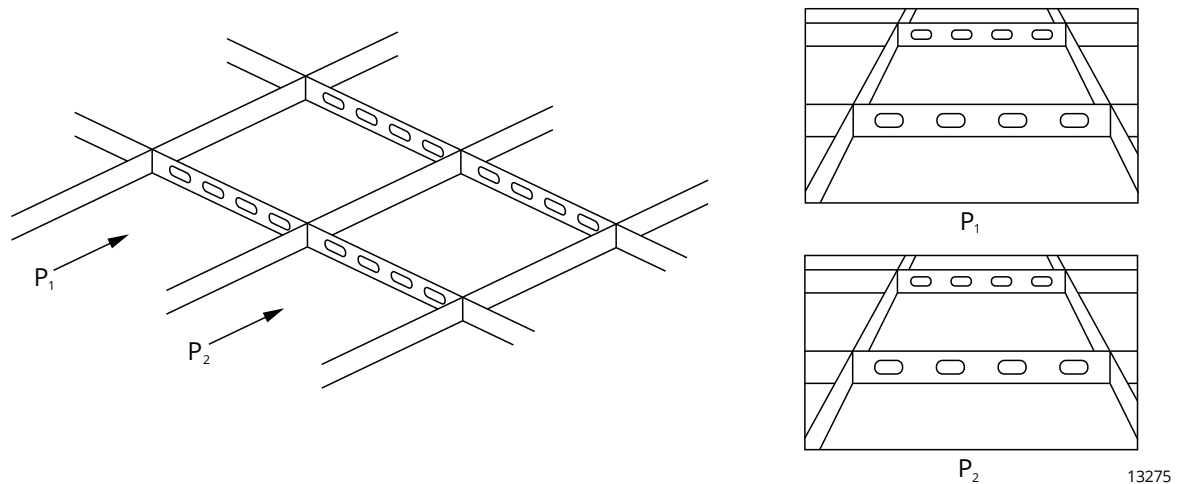


Abbildung 75: Mehrdeutigkeit der Ansicht bei Kantentracking

Da die Initialisierung über Kantenmodelle voraussetzt, dass die Kanten deutlich sichtbar und nicht verdeckt im Kamerabild zu sehen sind, bietet sich diese Methode vor allem in Szenarien an, in denen die Grundstruktur des Produkts über den Montagezeitraum erhalten bleibt oder vorhersehbar ist. Abbildung 76 vergleicht die Vor- und Nachteile der drei Methoden über Marker und Kantenmodelle und gibt jeweils ein Verwendungsbeispiel an. Aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften der Produkte und Fertigungssituationen eignen sich die Methoden jeweils für unterschiedliche Zwecke.

	auf Werkstück	an künstlicher Vorzugsposition	an natürlicher Vorzugsposition	über Kantenerkennung
Aufwand für Trackingstart	+	o	-	-
Gültigkeit des Markers	-	o	+	o
Installationsaufwand	-	-	+	+
Materialaufwand	-	o	+	+
beispielhaftes Szenario	Schaltschrank-verdrahtung	Retrofit mit vorangehendem 3D-Laserscanning	Sektions-ausrüstung im Schiffbau	Getriebemontage

+ = gut, o = mittel, - = schlecht

13276

Abbildung 76: Vergleich der Methoden zur Feininitialisierung

Die fehlenden Informationen für die Feininitialisierung – z. B. die Pose des Markers oder das auszuwählende Kantenmodell – liefert die Grobinitialisierung.

4.5.3 Grobinitialisierung

Das Ziel der Grobinitialisierung ist es, ein geeignetes und eindeutiges Merkmal für die Feininitialisierung auszuwählen, bspw. eine Markerposition oder ein Kantenmodell. Hierbei dienen nicht oder ungenau vermessene Indikatoren als Startpunkt für die Feininitialisierung. Beispiele für solche Indikatoren sind QR- oder DataMatrix-Codes, RFID- oder NFC-Tags, die z. B. die Pose des nächstgelegenen Markers enthalten. Abbildung 77 zeigt

zwei Beispiele für Indikatoren, die darin enthaltenen Informationen und, wie der Trackingbaukasten diese Informationen im Fall eines Markers bzw. eines Kantenmodells nutzt.

Beispiel QR-Code (Schiffbau)

**Produkt:**

Identifikator: SECTION_0338

Marker:

Identifikator: 127

Größe: 82 mm

Translationsvektor:

X: 134485 mm

Y: 10150 mm

Z: 24850 mm

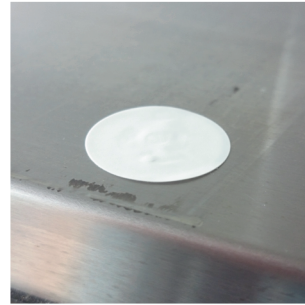
Rotationsquaternion:

A: 0,7071687

B, C: 0

D: -0,7071687

Beispiel NFC-Tag (Schaltschrankmontage)

**Produkt:**

Identifikator: cab_016_3742

Kantenmodell:

Identifikator: EDGE_02

13277

Abbildung 77: Indikatoren und darin enthaltene Informationen

Ebenfalls eignen sich Nutzereingaben, bspw. das Auswählen eines Bauteils oder einer natürlichen Vorzugsposition im CAD-Modus der Anwendung, als Indikator für den aktuellen Standort des Mitarbeiters. Zusätzliche Quellen wie etwa Inertialsensoren lassen sich verwenden, um die Blickrichtung des Mitarbeiters festzustellen und zusammen mit dessen Grobposition ein geeignetes Kantenmodell für die Feininitialisierung auszuwählen. Im Folgenden ist ein Anwendungsbeispiel für die Grobpositionierung aufgeführt.

Anwendungsbeispiel Schaltschrankmontage: Grobinitialisierung

Der Indikator, ein auf einem Schaltschrank angebrachter NFC-Tag, enthält Informationen über ein zu ladendes Kantenmodell. Hält ein Mitarbeiter das Gerät in die Nähe des NFC-Tags, erfährt die Anwendung aus den Daten, dass es sich um den Schaltschrank cab_016_3742 handelt und das Kantenmodell EDGE_02 für die Feininitialisierung zu laden ist.

Der Trackingbaukasten ermöglicht es, die digitale Arbeitsunterlage in einer Vielzahl von Szenarien mit Augmented Reality zu verwenden. Das folgende Anwendungsbeispiel zeigt die vollständige Lösung für die Sektionsausrüstung im Schiffbau von der Grobinitialisierung bis zum kontinuierlichen Tracking.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Trackingbaukasten

Für eingemessene Vorzugspositionen: Der Indikator (hier ein auf einer Schiffssektion aufgeklebter Data-Matrix-Code) enthält Informationen über eine künstliche Vorzugsposition (vgl. [Mosk16, S. 96]) in unmittelbarer Nähe (in Abbildung 78 A.) gelb). Der Mitarbeiter liest den Code mit der Tablet-Kamera ein, und die Anwendung erkennt die Pose (um X, Y, Z vom Koordinatenursprung entfernt und um 270° um die Z-Achse rotiert) und die Art des Markers (82 mm Kantenlänge, Code 127), den der Mitarbeiter an der Vorzugsposition angebracht hat. Über den Marker erfolgt die Feininitialisierung (B.). Sobald der Marker nicht sichtbar ist, führt die Anwendung das Tracking über Features fort (C. zu D.).

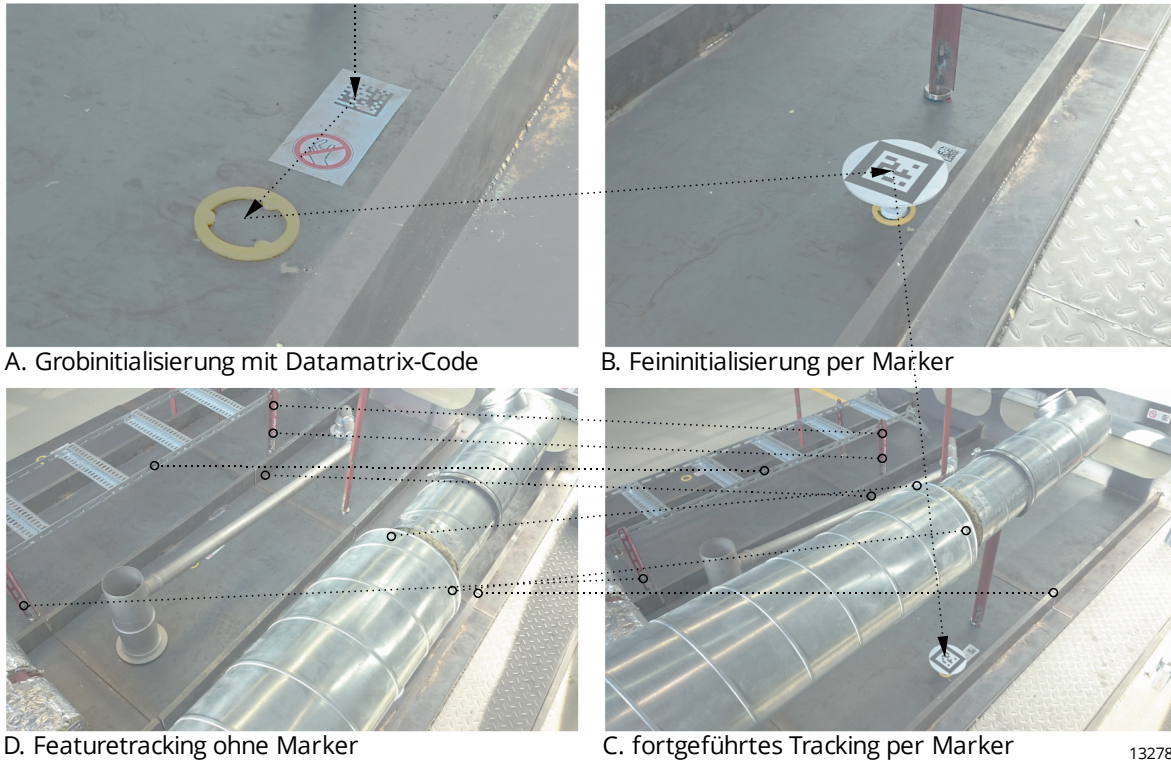


Abbildung 78: Funktionsweise des Trackingbaukastens in der Sektionsausrüstung

4.6 Datenorganisation und -übertragung

Die Arbeitsvorbereitung muss die benötigten Informationen für die Anzeige auf den mobilen Endgeräten verfügbar machen. Hierfür stellt ein zentraler Server die jeweils benötigten Daten für die Endgeräte zum Abruf bereit. Der folgende Abschnitt beschreibt, wie die Daten strukturiert sein müssen, und wie ein gesicherter Zugriff auf sie erfolgen kann.

4.6.1 Datenmodell

Digitale Arbeitsunterlagen erfordern, dass sich die Eingangsdaten in einer definierten Struktur befinden, die eine automatische Verarbeitung erlaubt. Das im Folgenden vorgestellte Datenmodell gibt eine solche Struktur vor, die in der Lage ist, Arbeitspläne darzustellen. Essentiell sind hierfür eindeutige Beziehungen zwischen den einzelnen Informationsteilen. Dies schafft bspw. die Zuordnung von 3D-Geometrie in einer CAD-Datei zu

einer Bauteilnummer in einem Arbeitsplan und Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Produktteilen, bspw. Bauteilen, die zu einer Baugruppe gehören, sowie Baugruppen, die wiederum zu einer größeren Baugruppe gehören. Diese Informationen können implizit in Stücklisten, Arbeitsplänen oder z. T. auch als Erfahrungswissen vorliegen. Teilweise existieren bereits ähnliche Strukturen in der CAD-Datenhaltung von Unternehmen – so können bspw. Arbeitspakete in der CAD-Datei zu einzelnen Baugruppen zusammengefasst sein, was unterstützend wirkt. Die beschriebene Lösung gibt eine Struktur vor, in der die Daten abgelegt sein müssen. Während die prototypische Umsetzung diese Struktur einzu-eins in einer Datenbankanwendung realisiert, die die Daten gesammelt vorhält, lässt sich die Struktur auch über mehrere bestehende Systeme (CAD, ERP, PDM, PLM) verteilt darstellen, sofern die eindeutige Zuordnung der Beziehungen der Daten untereinander gewährleistet ist. Abbildung 79 veranschaulicht den Unterschied mit beispielhaften Daten, die auf ein CAD- und ein ERP-System verteilt sind.

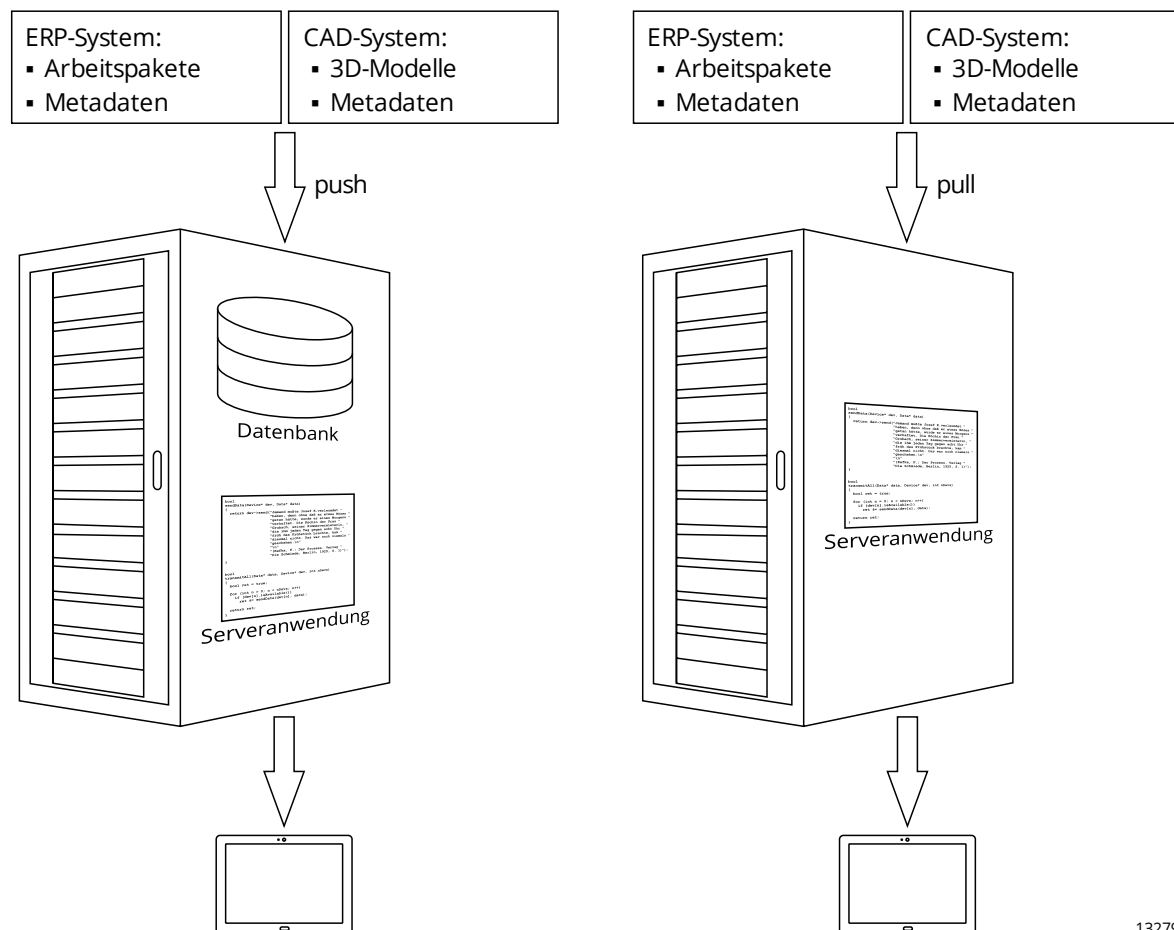


Abbildung 79: Speicherung der Daten in einer vorgelagerten Datenbank (links) und Direktzugriff auf bestehende Systeme (rechts)

Die indirekten Bereiche speisen entweder die gesamten Informationen in eine vorgeschaltete Datenbank ein, aus der die Serveranwendung den mobilen Endgeräten bei Bedarf Da-

ten zur Verfügung stellt (links) oder eine Serveranwendung greift direkt auf die bestehenden Systeme zu, wenn mobile Endgeräte Daten benötigen (rechts).

Im Einzelnen sind die folgenden Kategorien von Daten für die Bereitstellung von Informationen in digitalen Arbeitsunterlagen relevant [Brit16, S. 38ff.]:

- Daten über das Produkt und dessen Aufbau (im Folgenden *Produktabbild*):
Sie beschreiben das Produkt, dessen Teile, Geometriedaten, Metadaten und die Abhängigkeiten zwischen Produktteilen und Baugruppen.
- Daten über die Unternehmensorganisation (im Folgenden *Organisationsdaten*):
Sie beschreiben die für die Fertigung relevanten Teile des Unternehmens, die Zuordnung von Mitarbeitern zu Unternehmensbereichen sowie Qualifikationen der Mitarbeiter, die eine automatische Arbeitspaketverteilung vereinfachen.
- Daten über den Produktionsablauf (im Folgenden *Produktionsdaten*):
Sie beschreiben den Ablauf der Erzeugung des Produkts. In den Produktionsdaten sind die Zuordnung von Arbeitsschritten zu Bauteilen, Angaben über den Status von Arbeitsschritten (bspw. *erledigt* oder *fehlerhaft*), Termindaten und die Zuordnung von Arbeitspaketen zu Mitarbeitern enthalten.

Die Kategorien sind im Folgenden näher beschrieben und anhand von Entity-Relationship-Diagrammen (ER-Diagrammen) dargestellt.

Produktabbild

Als Hauptbestandteil des Datenmodells ist zunächst das Produktabbild von Bedeutung. Der weitgehend allgemeingültige Aufbau von Produkten ist in Abschnitt 2.1 erläutert. Das Produktabbild (siehe Abbildung 80) orientiert sich hieran und besteht aus vier Komponenten: Produkten, Baugruppen, Bauteilen und Dateien.

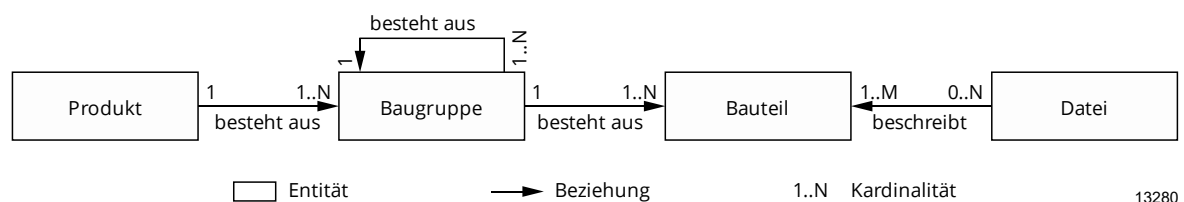


Abbildung 80: Schematische Darstellung des Produktabbilds

Ein Bauteil kann dabei auf Dateien verweisen, die Informationen über das Bauteil oder einen damit auszuführenden Vorgang enthalten (bspw. Geometriedaten, Metadaten oder Dokumente). Baugruppen fassen Bauteile zusammen, können allerdings auch Unterbaugruppen enthalten. Das Produkt fasst schließlich die Baugruppen auf oberster Ebene zusammen. Zu beachten ist, dass das Produktabbild keinerlei Informationen zu den Produktionsdaten enthält, sondern ausschließlich den Aufbau des Produkts beschreibt.

Produktionsdaten

Wie zuvor beschrieben, stimmt der Konstruktionsbaum eines Produkts nur selten mit dem Fertigungsbaum überein: Die Arbeitsvorbereitung teilt Bauteile und Baugruppen in Arbeitspakete ein. Zusammen mit den Daten, die für die Ausführung der Tätigkeiten anfallen wie bspw. Termindaten und Zustandsdaten, beschreiben die Produktionsdaten den Ablauf der Fertigung. Schematisch sind die Produktionsdaten in Abbildung 81 dargestellt. Eine Produktinstanz beschreibt dabei das konkret zu fertigende Produkt. Sie verweist auf alle Arbeitspakete, die wiederum auf Arbeitsschritte verweisen. Jeder Arbeitsschritt ist dabei mit einem Bauteil oder einer Baugruppe aus dem Produktabbild verknüpft. Sowohl Arbeitspakete als auch Arbeitsschritte haben einen Status. Dieser erfüllt zwei Zwecke: Einerseits kann das System den Mitarbeitern gezielter Daten bereitstellen, wenn der Status der Bauteile und Arbeitspakete bekannt ist; andererseits dienen die Statusinformationen als Rückmeldung an die indirekten Bereiche, die aus ihnen bspw. Abarbeitungsgrade schätzen können.

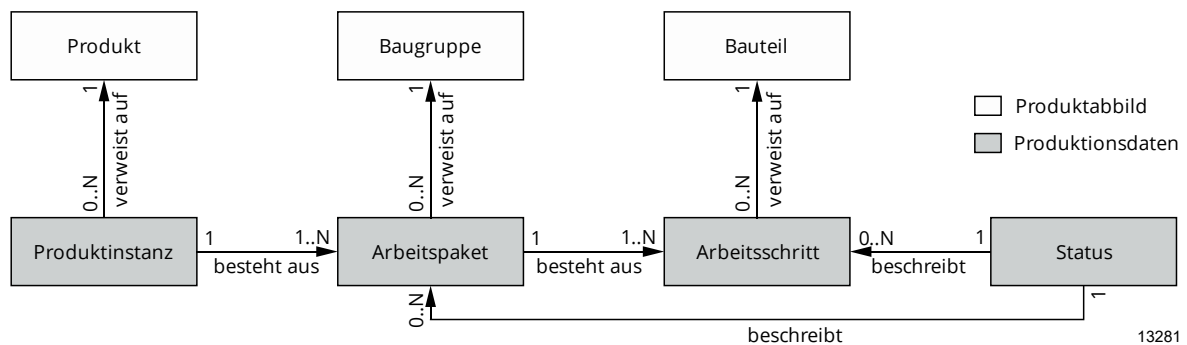


Abbildung 81: Schematische Darstellung der Produktionsdaten im Zusammenhang mit dem Produktabbild

Organisationsdaten

Da es das Ziel ist, im Datenmodell die vollständige Fertigung eines Produkts abzubilden, sodass eine digitale Arbeitsunterlage für möglichst viele sinnvolle Anwendungsfälle innerhalb eines Unternehmens nutzbar ist, kann sich im System ein sehr großer Bestand offener Arbeitspakete ergeben. Für die Praxistauglichkeit ist es wichtig, die Vergabe der Arbeitsinhalte möglichst effizient zu gestalten, was bspw. durch eine automatische individuelle Filterung von Arbeitspaketen für Mitarbeiter geschehen kann. Hierzu ist eine Struktur notwendig, die eine weitgehend automatisierte Eingrenzung der Arbeitspakete anhand von Faktoren ermöglicht wie bspw. dem Ort der Fertigung (Abteilung) oder der Qualifikationen des Mitarbeiters. Die in Abbildung 82 dargestellte Struktur beschreibt diese Faktoren. Ein Mitarbeiter ist einer oder mehreren Abteilungen zugeordnet (im Abwendungsbeispiel Schiffbau etwa *Sektionsausrüstung* oder *Rohrvorfertigung*) und hat eine oder mehrere Qualifikationen (bspw. *Schweißen* oder *Elektroinstallation*). Arbeitspaketen sind wiederum die Abteilung sowie die zur Ausführung erforderlichen Qualifikationen zugeordnet.

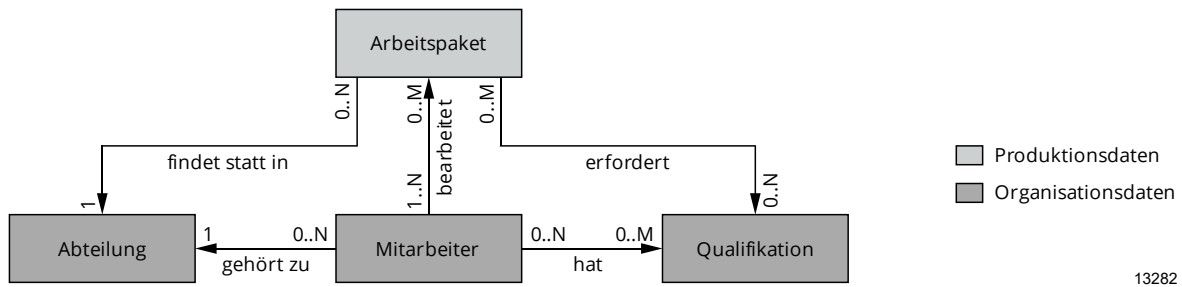


Abbildung 82: Schematische Darstellung der Organisationsdaten

Die Organisationsdaten enthalten zudem die Zugangsdaten der Mitarbeiter, mit denen der Server deren Authentizität überprüft und den Zugang zum System gewährt oder verweigert.

Gesamtmodell

Das Gesamtmodell mit den Beziehungen zwischen Produktabbild, Organisationsdaten und Produktionsdaten ist in Abbildung 83 dargestellt.

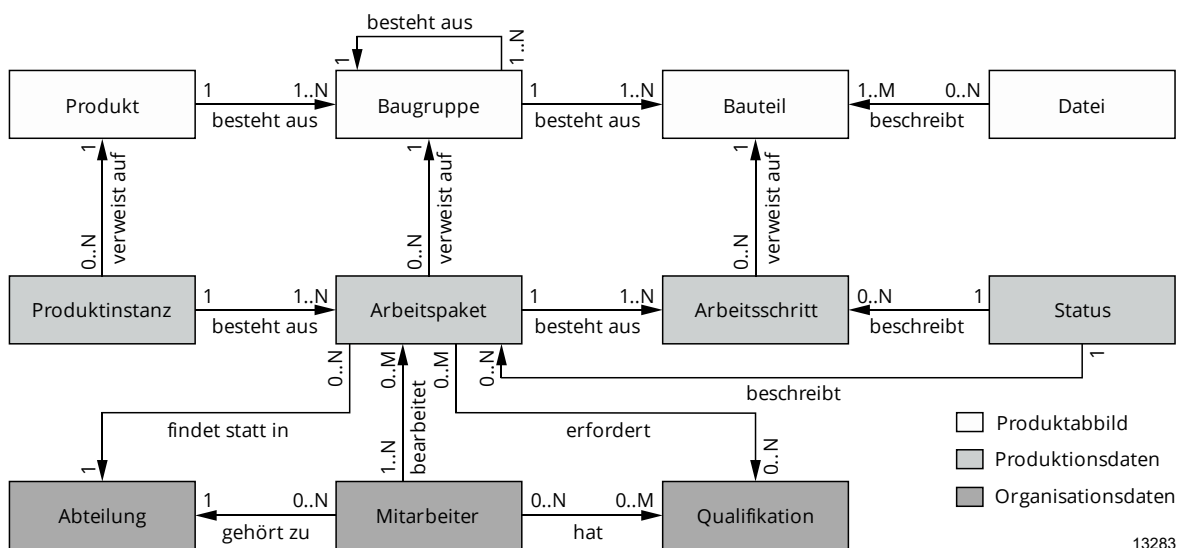


Abbildung 83: Schematische Darstellung des gesamten Datenmodells

4.6.2 Datenbereitstellung

In herkömmlichen Prozessen macht die Arbeitsplanung die Papierunterlagen für die direkten Bereiche verfügbar, nachdem die Bearbeitung der Daten größtenteils abgeschlossen ist und eine Einteilung in Arbeitspakete sowie ggf. eine Reihenfolgebildung erfolgt sind. Für die Arbeit mit der digitalen Arbeitsunterlage überträgt die Arbeitsplanung an dieser Stelle die Daten in die Datenbank und gibt sie für den Zugriff durch die mobilen Endgeräte frei. Um die Daten aus intern genutzten Arbeitsvorbereitungs-Programmen (bspw. Excel oder eine ERP-Software) in das Datenbankformat zu überführen, müssen Unternehmen indivi-

duelle Lösungen erarbeiten. Solche Export-Skripte sind im Folgenden als Konnektoren bezeichnet: Sie verbinden die Unternehmens-Datenhaltung mit der Datenbank der digitalen Arbeitsunterlage. Die Bereitschaft eines Unternehmens, einen Konnektor zu erstellen oder erstellen zu lassen, entscheidet maßgeblich über den erfolgreichen Einsatz digitaler Arbeitsunterlagen. Standardisierte Schnittstellen zu verbreiteter Software sind zwar umsetzbar, jedoch wären auch diese so anzupassen, dass sie unternehmensspezifische Methodiken, bspw. bei der Benennung von Metadaten oder den Zusammenhängen zwischen Bauteilbezeichnern und CAD-Dateien, berücksichtigen.

Vor allem im Hinblick auf die Vielzahl unterschiedlicher CAD-Dateiformate stellt sich die Frage, an welcher Stelle eine Konvertierung der CAD-Daten in ein einheitliches, für eine flüssige Anzeige der 3D-Modelle auf den mobilen Endgeräten geeignetes Oberflächenformat stattfinden muss: vor der Übertragung auf die Endgeräte oder auf den Endgeräten selbst. Für die erstgenannte und in dieser Arbeit verwendete Variante sprechen vier wesentliche Vorteile:

- Oberflächenmodelle benötigen typischerweise weniger Speicherplatz als die zugrundeliegenden CAD-Modelle, sodass ihre Übertragungsdauer auf die mobilen Endgeräte geringer ausfällt.
- Findet die Konvertierung vor der Übertragung statt, lassen sich unternehmensspezifische Maßnahmen treffen, die die Datenmenge reduziert (bspw. die Vereinfachung von 3D-Modellen, die einen Detailgrad aufweisen, der nur für die Konstruktion, nicht aber für die Fertigung von Belang ist).
- Die Konvertierung der CAD-Daten in Oberflächenmodelle ist in der Regel rechenintensiv, sodass für den Anwender Wartezeiten entstehen können, wenn diese erst auf dem Endgerät stattfindet.
- Sofern Unbefugte Zugriff auf die mobilen Endgeräte erlangen, können sie aus CAD-Daten mehr Unternehmens-Knowhow ziehen als aus Oberflächenmodellen.

Die prototypische Umsetzung der digitalen Arbeitsunterlage verwendet dabei die folgenden Datenformate. Die Auswahl fiel auf leichtgewichtige, freie Formate:

- Oberflächenmodelle zur Anzeige: Wavefront OBJ (.obj)
mit Material Template Libraries (.mtl)
- Metadatendarstellung: JavaScript Object Notation (.json)
- zusätzliche Dokumente: Portable Document Format (.pdf)
- Bemaßungsmodelle: Initial Graphics Exchange Specification (.igs)

4.6.3 Datensicherheit

Um zu verhindern, dass Unbefugte Zugriff auf das geistige Eigentum des Unternehmens erlangen, muss das System die Sicherheit der Arbeitsinhalte zu jedem Zeitpunkt gewährleisten (Anforderung A3). Die Daten müssen dementsprechend an drei Stellen geschützt sein: auf dem Server, während der Übertragung an die Endgeräte und während ihrer Verweildauer auf den Endgeräten (Abbildung 84).

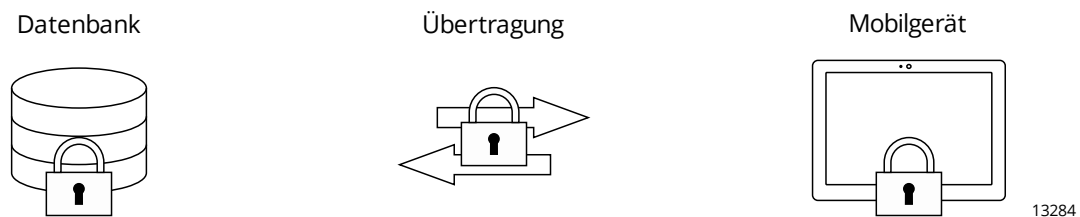


Abbildung 84: Drei Punkte der Datensicherheit: auf dem Server, während der Übertragung und auf dem Endgerät

Hieraus ergeben sich drei Herausforderungen:

- Der Zugriff auf den Server muss auf befugte Personen beschränkt sein.
- Der Server muss die Daten verschlüsselt an die Endgeräte übermitteln.
- Die Daten müssen auf den Endgeräten in verschlüsselter Form vorliegen.

Zugriff auf Server

Die Personengruppe, die befugt sein soll, über die mobilen Endgeräte auf die Arbeitsinhalte zuzugreifen, besteht aus den Mitarbeitern der Fertigung. Diese müssen sich gegenüber dem Server authentifizieren, der deren Zugangsdaten verschlüsselt in der Mitarbeitertabelle speichert und Zugriff gewähren oder verweigern kann. Zur Authentifizierung eignen sich grundsätzlich drei Methoden [Braz06, S. 202]: Der Benutzer hat eine Information (z. B. ein Passwort), er ist im Besitz eines ihn identifizierenden Gegenstands (z. B. einer ID-Karte) oder er weist sich durch seine Anwesenheit selbst (über biometrische Merkmale) aus.

Die Verwendung biometrischer Merkmale scheidet für den Einsatzbereich der Lösung aus, da die Mitarbeiter der Fertigung häufig Schutzkleidung (Handschuhe, Schutzbrillen) tragen, die die Erkennung beeinträchtigt. Die beiden anderen Möglichkeiten sind serverseitig vorgesehen, indem eine Passphrase für jeden Mitarbeiter (mit einer kryptologischen Hashfunktion verschlüsselt) in der Datenbank abgelegt ist. Für die prototypische Umsetzung gibt der Mitarbeiter seine Passphrase am Endgerät ein und authentifiziert sich dadurch gegenüber dem Server. Für weitere Einsatzzwecke kann auch der Einsatz von RFID- oder NFC-basierten ID-Karten zur Authentifizierung sinnvoll sein, um die Passphrase zu ersetzen oder zu ergänzen.

Sichere Verbindung

Um einem Abhören der ggf. drahtlos zwischen Server und mobilen Endgeräten ausgetauschten Daten entgegenzuwirken, muss die Kommunikation verschlüsselt stattfinden. Die prototypische Umsetzung greift hierzu auf den weitverbreiteten Transport Security Layer (TSL [Dier08, S. 1-104]) zu, um eine verschlüsselte Verbindung aufzubauen. Hierbei identifiziert sich der Server dem Endgerät gegenüber mit seinem Zertifikat, das dieses verifiziert. Optional kann auch der Server vom Endgerät ein Zertifikat einfordern. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn das Unternehmen einen Zugriff von fremden Geräten aus verhindern möchte, auf denen aber möglicherweise die Software-Applikation installiert ist. In der Regel ist jedoch von einer bereits vorhandenen Zugriffsbeschränkung auszugehen, sodass Fremdgeräte keinen Zugang zum Firmennetzwerk haben. Nach dem Austausch der Zertifikate einigen sich Server und Endgerät auf einen symmetrischen Schlüssel, mit dem sie fortan alle zu versendenden Daten verschlüsseln.

Sicherheit auf Endgeräten

Die Sicherheit der Daten auf dem Endgerät hängt von zwei Faktoren ab: Das Endgerät darf nicht durch fremde Software korumpiert sein, deren Zweck es ist, die Daten zu entwenden, und die Daten dürfen weder unverschlüsselt noch leicht zugänglich abgelegt sein (bspw. auf einer entnehmbaren Speicherkarte).

Um dem ersten Faktor entgegenzuwirken, existiert Software für Mobile Device Management (MDM [Scar12, S. 450]), die Administration mobiler Endgeräte. Über diese lassen sich potenzielle Kanäle und Funktionen sperren, über die Schadsoftware auf die Geräte gelangen kann, die bspw. die eigentliche Software emuliert und die vom Server empfangenen Daten abgreift. Ebenfalls bietet MDM-Software die Möglichkeit, eine Fernlöschung der Geräte durchzuführen, falls diese in den Besitz Unbefugter gelangen oder bspw. das Unternehmensgelände verlassen.

Um den Zugriff auf die Daten im Endgerät zu verhindern, darf die Software diese nur im flüchtigen Speicher unverschlüsselt ablegen; da der Benutzer potenziell Zugriff auf den permanenten Speicher hat, müssen dort abgelegte Daten immer verschlüsselt sein. Da sowohl der Umfang der benötigten Daten als auch die Kapazität des flüchtigen Speichers auf dem Endgerät nicht von vornherein bekannt sind, muss das Sicherheitskonzept den Fall berücksichtigen, dass die Software Daten im permanenten Speicher ablegt – hierbei könnte es sich bspw. um Dokumente handeln, die die Software erst bei Bedarf in den flüchtigen Speicher lädt. Um unverschlüsselten Daten im permanenten Speicher entgegenzuwirken, sendet der Server jede Datei bereits verschlüsselt an die Endgeräte. Den Schlüssel handeln beide Geräte bereits beim Aufbau der Verbindung aus. Entsprechend lassen sich Daten nur auf genau dem Gerät entschlüsseln, das die Verbindung zum Server aufgebaut hat. Ebenso kann das Gerät nur Daten aus der aktuellen Sitzung entschlüsseln: Die Daten verlieren ihre Gültigkeit, sobald der Mitarbeiter den Arbeitsvorgang beendet.

4.6.4 Arbeitspaketauswahl

Unternehmen können Arbeitspakete auf unterschiedliche Arten vergeben:

- a) Ein Mitarbeiter erhält einen Auftrag mit Unterlagen (bspw. nach Einteilung durch einen Vorgesetzten) und sucht daraufhin das zugehörige Arbeitsmaterial auf.
- b) Ein Mitarbeiter erhält Arbeitsmaterial (bspw. aus einem Auftragspuffer oder bei Bereitstellung durch einen Logistiker) und benötigt daraufhin die zugehörigen Unterlagen.

Bei der Verwendung digitaler Arbeitsunterlagen ist es aus Produktivitätsaspekten (Anforderung P2) notwendig, dem Mitarbeiter möglichst schnell Zugriff auf die zum Auftrag gehörenden Dokumente zu geben, unabhängig davon, ob zuerst die Unterlagen oder das Arbeitsmaterial vorliegt. Eine dritte Variante, die erst durch die Verwendung digitaler Arbeitsunterlagen und einen zentralen Server möglich ist, ist eine automatische Verteilung von Arbeitspaketen. Die Auswahl der Arbeitspakete über den Server greift diese drei Möglichkeiten auf und bietet zwei Varianten der Arbeitspaketverteilung:

- direkte Zuordnung zu einem Mitarbeiter durch Vorgesetzte
- automatische Auswahl auf Basis von Produkt-, Arbeitspaket- und Mitarbeiterparametern

In dem Moment, in dem sich ein Mitarbeiter auf einem mobilen Endgerät anmeldet und ein neues Arbeitspaket anfordert, übermittelt der Server dem Endgerät eine Liste der möglichen Arbeitspakete für den Mitarbeiter. Diese besteht aus allen Arbeitspaketen, die ihm ein Vorgesetzter direkt zugeordnet hat, und allen Arbeitspaketen, die sich für den Mitarbeiter aus den automatischen Vorschlägen ergeben. Als Standard priorisiert die digitale Arbeitsunterlage direkte Zuordnungen und blendet automatische Vorschläge aus. Da sich je nach Unternehmen möglicherweise andere Voraussetzungen ergeben, lässt sich das Priorisierungsverhalten konfigurieren.

Direkte Zuordnung

In diesem Fall trifft ein Vorgesetzter, bspw. ein Meister oder Vorarbeiter, die Entscheidung, welches Arbeitspaket oder welche Arbeitspakete ein Mitarbeiter bearbeiten soll. Diese Tätigkeit kann er etwa bei Schichtbeginn ausführen. Die Zuordnungen speichert der Server in der Datenbank.

Automatische Auswahl

Anstatt eine manuelle Zuordnung vorzunehmen, besteht die Möglichkeit, den Server auf Basis von bekannten Parametern Vorschläge für geeignete Arbeitspakete machen zu lassen. Parameter, die der Server hierzu heranzieht, sind:

- Mitarbeiterparameter: Abteilung, Qualifikationen
- Arbeitspaketparameter: erforderliche Qualifikationen, Fertigungsort, Plan-Endtermin, Status
- Produktparameter: Produktname, Baugruppenname

Über die Parameter lassen sich die Arbeitspakete eingrenzen, die für die Mitarbeiter in Frage kommen: Der Server schlägt dem Mitarbeiter lediglich die Arbeitspakete vor, deren Fertigungsort seinem Beschäftigungsort (bspw. Sektionsausrüstung) entspricht und zu deren Ausführung er die erforderlichen Qualifikationen besitzt. Weiterhin schließt der Server Arbeitspakete aus, die bereits fertiggestellt oder in Bearbeitung sind.

Um den Fall abzudecken, in dem einem Mitarbeiter zunächst das Werkstück vorliegt, für das er das nächste Arbeitspaket aufrufen möchte, ist es zudem möglich, die Arbeitspakete auf ein bestimmtes Produkt oder eine Baugruppe einzugrenzen. Hierzu gibt der Mitarbeiter vor dem Abrufen der Arbeitspaketliste die eingrenzenden Parameter an, bspw. indem er die Produkt- oder Baugruppennummer eingibt oder einen QR-Code auf dem Werkstück einliest, der diese Informationen enthält.

Da die Liste, sowohl bei direkter Zuordnung als auch bei automatischer Auswahl, mehr als ein Arbeitspaket enthalten kann, jedoch anzunehmen ist, dass es Arbeitspakete gibt, die anderen – nach einem jeweils zu definierenden Maßstab, bspw. der Fälligkeit – vorzuziehen sind, muss eine Priorisierung möglich sein. Um die allgemeine Anwendbarkeit des Servers zu gewährleisten, legt dieser hierfür keine Maßstäbe fest. Stattdessen lässt sich die Priorisierung je nach Anwendungsfall in der mobilen Applikation konfigurieren. So kann diese dem Mitarbeiter bspw. die vollständige Arbeitspaketliste anzeigen – sortiert nach Fälligkeitsdatum – oder direkt das dringlichste Arbeitspaket abrufen. Lässt sich kein sinnvoller Maßstab definieren, oder existieren mehrere Arbeitspakete, deren Priorität identisch ist, bestehen zwei Gefahren:

- Mitarbeiter wählen eher Arbeitspakete aus, die oben in der Liste stehen. Es entsteht eine implizite Priorisierung (bspw. aufgrund einer alphabetischen Sortierung).
- Fordern mehrere Mitarbeiter gleichzeitig die Arbeitspaketliste an, kann sich der Auswahlprozess verlängern, weil ggf. ein Kollege wenige Sekunden zuvor dasselbe Arbeitspaket ausgewählt hat und es inzwischen gesperrt ist.

Es ist deshalb vorgesehen, dass die Applikation auf dem mobilen Endgerät in solchen Pattsituationen zufällig Arbeitspakete priorisiert.

4.6.5 Datenauswahl

Nach der Auswahl des Arbeitspakets ist zu entscheiden, welche Inhalte für den Mitarbeiter relevant sind. Hierbei ist abzuwägen zwischen einer vollständigen Bereitstellung der Daten (Anforderung V1) und einer schnellen Übertragung der Daten auf die Geräte (Anforderung P2). Das Optimum ergibt sich, sofern der Server genau die Daten auf die Geräte überträgt, die der Mitarbeiter nutzt. In der Praxis ist es häufig aufgrund grobgranularer Reihenfolgevorgaben und individueller Arbeitsweisen schwierig, dieses Optimum zu erreichen, es lassen sich jedoch mit Kenntnissen über den Arbeitspakettyp und unter Zuhilfenahme der Informationsklassen (vgl. Abschnitt 4.2.3) Abschätzungen treffen.

Arbeitspakettyp

Während der Ausführung des Arbeitspakets kommt der Mitarbeiter mit Arbeitspaketinhalten zweier Arten in Berührung:

- aktive Inhalte: Bauteile oder -gruppen, die der Mitarbeiter unmittelbar verarbeitet
- passive Inhalte: Bauteile oder Baugruppen, die der Mitarbeiter zwar nicht unmittelbar verarbeitet, deren Vorhandensein allerdings Einfluss auf seine Arbeitsweise haben kann.

Zu den passiven Inhalten zählen etwa weitere Bauteile oder Baugruppen, die ein Mitarbeiter in einem anderen Arbeitspaket verarbeitet, die sich aber in der Nähe der aktiven Inhalte befinden (bspw. ein kreuzender Rohrstrang), oder Bauteile, die ein Mitarbeiter in einem Vorgängerarbeitspaket zu einer Baugruppe montiert hat.

Die Ausführung eines Arbeitspakets kann unterschiedliche Ziele haben, die sich auf die Menge der passiven Inhalte auswirken: den Zusammenbau von Teilen und Baugruppen oder den Einbau von Teilen oder Baugruppen in eine übergeordnete Baugruppe. Entsprechend dem Ziel des Arbeitspakets muss der Server die Daten im benötigten Umfang bereit. Die Entscheidung darüber, welche Interpretation des Arbeitspakets anzuwenden ist, lässt sich pro Arbeitspaket konfigurieren. Bei hochflexiblen Fertigungsformen ist es ebenfalls möglich, dem Mitarbeiter die Wahl zu überlassen.

Das folgende Anwendungsbeispiel verdeutlicht den Unterschied zwischen Zusammenbau und Einbau und zeigt die jeweils zu übertragenden Inhalte auf.

Anwendungsbeispiel Schiffbau: Arbeitspaketauswahl

Der exemplarische Datensatz in Abbildung 85 stellt den Aufbau einer Sektion dar. Je nach Arbeitspaket muss die Anwendung unterschiedliche Daten vom Server abrufen.

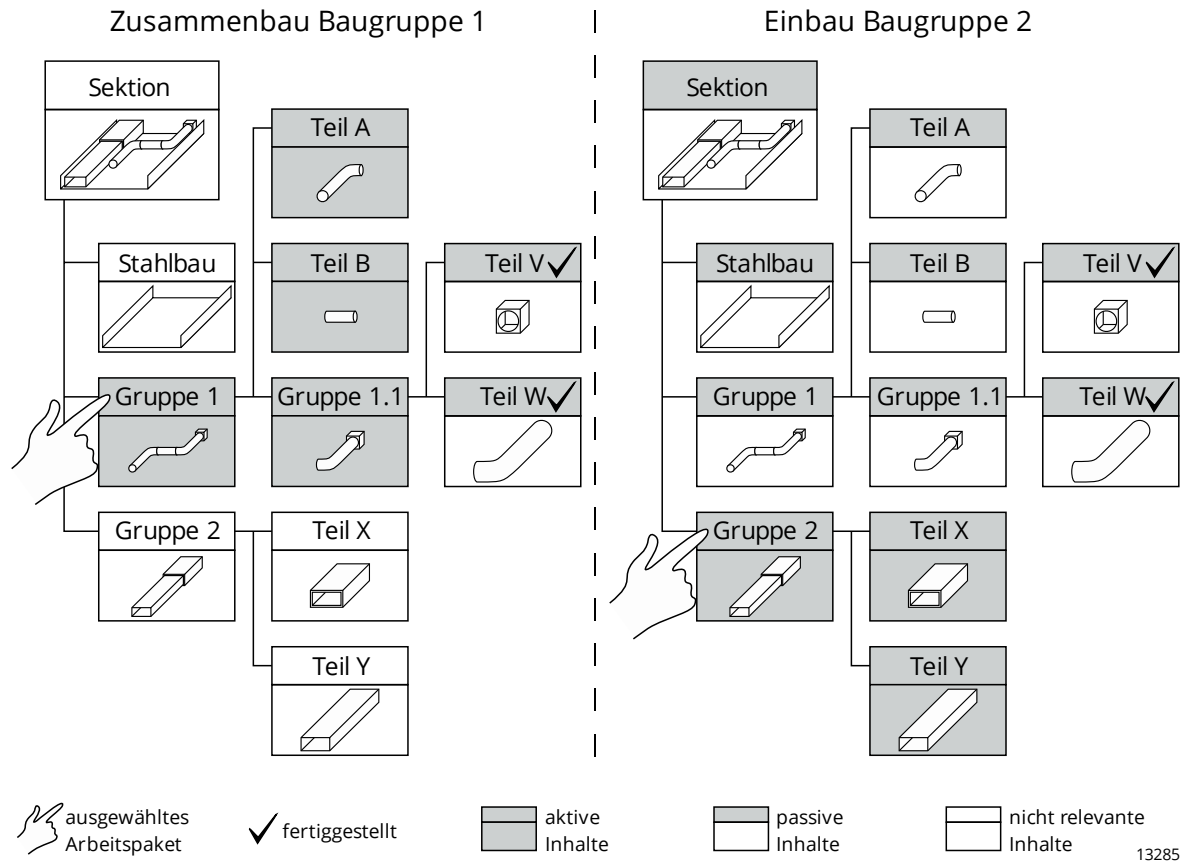


Abbildung 85: Zwei Beispiele für die Interpretation eines Arbeitspakets: Zusammenbau von Baugruppe 1 (links) und Einbau von Baugruppe 2 in die Sektion (rechts)

Zusammenbau

Beim Zusammenbau (Abbildung 85, links) montiert der Mitarbeiter mehrere Bauteile zu einer Baugruppe (im Beispiel die Bauteile A und B sowie Baugruppe 1.1 zu Baugruppe 1). In diesem Fall besteht sein aktiver Arbeitsinhalt aus der Montage aller noch nicht montierten Bauteile der Baugruppe (Bauteile A und B sowie Baugruppe 1.1), der passive Inhalt aus bereits vormontierten Bauteilen (Bauteile V und W).

Einbau

In diesem Fall montiert der Mitarbeiter die Bauteile seines Arbeitspakets in einer übergeordneten Baugruppe (im Beispiel alle Bauteile von Baugruppe 2, also Bauteile X und Y, auf der Sektion). Sein aktiver Arbeitsinhalt besteht damit aus der Montage der Baugruppe mit ihren enthaltenen Bauteilen (Baugruppe 2 mit Bauteilen X und Y). Zusätzlich ist für den Mitarbeiter auch die übergeordnete Baugruppe relevant (die Sektion) sowie deren weitere Baugruppen und Teile (Stahlbau und Baugruppe 1 sowie deren Abhängigkeiten). Diese Inhalte sind im Fall Einbau ebenfalls passiv.

Informationsklassen

Die in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Informationsklassen geben Aufschluss darüber, welche Informationen wie häufig für die Mitarbeiter relevant sind. Das Konzept verknüpft die Klassen an dieser Stelle mit den Kenntnissen darüber, ob ein Bauteil oder eine Baugruppe als aktiver oder passiver Inhalt eingestuft ist, um zu entscheiden, wie wahrscheinlich eine Nutzung der hinterlegten Informationen ist. Abbildung 86 gibt einen Überblick und teilt die Informationen ein in:

- primäre Daten, die der Mitarbeiter mit hoher Wahrscheinlichkeit nutzen wird, und
- sekundäre Daten, die der Mitarbeiter mit geringer Wahrscheinlichkeit nutzen wird.

Klasse	aktive Bauteile	passive Bauteile
I	primär	primär
K	primär	sekundär
S	primär	sekundär
H	primär	primär

13286

Abbildung 86: Einteilung der Informationen in primäre und sekundäre Daten

Die Einstufung der Daten hilft dabei, über die Menge und die Reihenfolge zu entscheiden, in der der Server die Daten im nächsten Schritt überträgt.

4.6.6 Datenübertragung

Sobald auf den mobilen Endgeräten bekannt ist, welche Inhalte der Mitarbeiter benötigt, kann der Server diese übertragen. Dabei existiert eine ideale Reihenfolge für die Übertragung der Daten, die gewährleistet, dass die Inhalte, die ein Mitarbeiter mit höchster Wahrscheinlichkeit benötigt, möglichst schnell verfügbar sind. Hierzu sendet der Server zunächst alle primären Daten, die zu aktiven Arbeitsinhalten gehören, im Anschluss alle primären passiven, zuletzt alle sekundären passiven Inhalte.

Es spricht vieles dafür, sofort sämtliche möglicherweise relevante Daten an die mobilen Endgeräte zu übermitteln: Das System soll Informationsbeschaffung vermeiden (Anforderung V1); zudem lässt sich mit einer vollständigen Übertragung sicherstellen, dass der Mitarbeiter auch außerhalb der Funkreichweite der Verbindung alle benötigten Inhalte aufrufen kann. In einigen Fällen ist es jedoch problematisch, wenn viele Mitarbeiter synchron Daten anfordern, da dies zu Engpässen führen kann, sodass für die Mitarbeiter unerwünschte Wartezeiten entstehen. Es bestehen deshalb zwei Übertragungsstrategien:

- alle Inhalte zu Beginn: In diesem Fall versucht der Server, alle Inhalte sofort an die Endgeräte zu übermitteln.
- primäre Inhalte zu Beginn: In diesem Fall übermittelt der Server nur die primären Inhalte sofort und stellt die sekundären Inhalte dann bereit, wenn der Mitarbeiter auf sie zugreifen möchte.

Während es Anwendungsbeispiele gibt, in denen unstrittig ist, welche Strategie anzuwenden ist, existieren Grenzfälle, die eine individuelle Beurteilung der Umstände erfordern. Die ausschlaggebenden Parameter sind die erreichbare Netzabdeckung am Fertigungsort, die Mitarbeiteranzahl, die Synchronität der Arbeitspaketvergabe und der Anteil der passiven Inhalte. Abbildung 87 gibt anhand der Parameter eine Entscheidungshilfe für die Übertragungsstrategie.

Situation	Übertragung zu Beginn	Übertragung bei Bedarf
Netzabdeckung	sporadisch	vollständig
Mitarbeiteranzahl	niedrig	hoch
Arbeitspaketvergabe	asynchron	synchron
sekundäre Inhalte	wenige	viele

13287

Abbildung 87: Beurteilungsparameter für Übertragungsstrategie

4.6.7 Datenaktualisierung

Aufgrund der hohen Flexibilität in der Unikatfertigung und des Simultaneous Engineering können Änderungen an Arbeitspaketen oder Bauteilen auftreten, während sich diese bereits in der Fertigung befinden. Um die (Neu-)Beschaffung aktualisierter Informationen zu vermeiden (Anforderung V1), müssen die Daten auf den mobilen Endgeräten zu jedem Zeitpunkt aktuell sein. Dies lässt sich gewährleisten, wenn die Arbeitsvorbereitung die geänderten Daten möglichst schnell an die Datenbank weitergibt, und eine Kommunikationsverbindung zu den Endgeräten besteht, die die entsprechenden Daten nutzen. Für die Detektion geänderter Arbeitsinhalte existieren zwei Möglichkeiten:

- Der Server speichert zu jedem Endgerät, welche Inhalte sich auf diesem befinden, und überwacht die entsprechenden Daten. Im Fall einer Änderung kontaktiert er die betroffenen Endgeräte und sendet ihnen die aktualisierten Daten.
- Die Endgeräte kontaktieren den Server periodisch (bspw. alle 10 Minuten), wobei sie ihm mitteilen, welche Inhalte sie verwenden. Der Server überprüft die entsprechenden Inhalte in der Datenbank auf Änderungen und versendet ggf. die aktualisierten Daten.

Für die zweite Variante sprechen vor allem die niedrigere Komplexität auf der Serverseite sowie die Tatsache, dass bei sporadischer oder unvollständiger Netzaabdeckung die mobilen Endgeräte den Server sofort kontaktieren können, sobald sie eine Verbindung zum Netzwerk erkennen. Im Gegensatz zur ersten Variante entsteht allerdings eine Latenz zwischen der Eingabe in die Datenbank und der Aktualisierung auf den betroffenen Endgeräten – durchschnittlich ein halbes Abfrageintervall. Da sich dieses auf den Endgeräten konfigurieren lässt, und die pro Abfrage verschickte Datenmenge so gering ist, dass sie die Verbindung zum Server auch bei kurzen Intervallen nicht nennenswert belastet, ist die Latenz in der Praxis vernachlässigbar.

4.6.8 Rückmeldedaten

Da der Mitarbeiter beim Weiterschalten auf den nächsten Arbeitsschritt automatisch eine Rückmeldung über den Status des letzten Vorgangs abgibt (bearbeitet oder fehlerhaft), fallen präzise Rückmeldedaten in einem Detailgrad ab, der sich unter Verwendung von Papierunterlagen nur unter sehr hohem zusätzlichen Aufwand erreichen ließe. Die beschriebene Datenstruktur gibt eine Möglichkeit vor, die Rückmeldedaten abzulegen, sodass indirekte Bereiche auf sie zugreifen und sie bei Bedarf weiterverarbeiten können.

Die Status-Tabelle der Datenbank enthält hierzu sowohl den Status einzelner Bauteile als auch den Status gesamter Arbeitspakete. Folgende mögliche Ausprägungen des Status sind vorgesehen; sie lassen sich bei etwaigen weiteren Zwischenschritten wie bspw. logistischen Aufgaben erweitern:

- ausstehend
- in Bearbeitung
- bearbeitet
- fehlerhaft

Jeder Status enthält darüber hinaus Informationen darüber, welcher Mitarbeiter ihn gemeldet hat, einen Zeitstempel und ein Feld für Zusatzinformationen, in dem sich Beschreibungen oder Dokumentationen hinterlegen lassen – bspw. als Foto einer Fehlersituation oder eines abweichend erfolgten Einbaus. Die mobilen Endgeräte übermitteln geänderte Statusinformationen bei bestehender Netzwerkverbindung an den Server, sodass die Datenbank ein virtuelles Abbild des Fertigungsstands und eine Fertigungshistorie enthält. Diese lassen sich bspw. nutzen, um den Fertigungsstand abzufragen oder Ist-Zeiten für die Bearbeitungsdauer von Arbeitsschritten oder Arbeitspaketen aufzunehmen, auf Basis derer die indirekten Bereiche ihre Planung präzisieren können. Die verantwortlichen indirekten Bereiche können Fehlermeldungen oder Meldungen über vom Konstruktionsmodell abweichende Aufbauten aus der Datenbank auslesen und Korrekturmaßnahmen vornehmen. Auf diese Weise entsteht ein verbesserter Informationsregelkreis.

5 Validierung der digitalen Arbeitsunterlage

Zur Validierung der Konzepte kam der Prototyp der digitalen Arbeitsunterlage in mehreren Szenarien zum Einsatz. Ziel war es hierbei:

- a) die Einsatztauglichkeit in einer industriellen Fertigung zu validieren und zu überprüfen, ob die theoretisch abgeleiteten Potenziale in der Produktivität und der Fehlerreduktion realistisch sind, und
- b) die Potenziale detailliert zu messen, um zu einer signifikanten Aussage zu gelangen, ob und unter welchen Voraussetzungen die entworfene digitale Arbeitsunterlage herkömmlichen Papierzeichnungen überlegen ist.

Hierzu fanden elf Versuche mit unterschiedlichen Personengruppen statt, davon sechs Realversuche in Fertigungsumgebungen und fünf Laborversuche, sowie ein technischer Versuch zur Datenübertragung. Die Zielsetzung bei der Validierung der digitalen Arbeitsunterlage war es, möglichst alle Anforderungen messbar zu überprüfen. Für die Anforderungen, deren Erfüllungsgrad objektiv messbar ist, kamen hauptsächlich Zeit- und Fehlermessungen zum Einsatz, für Anforderungen, deren Erfüllungsgrad subjektiv ist, standardisierte Befragungen der Versuchspersonen. Abbildung 88 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise bei der Evaluierung der einzelnen Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.4).

Anforderung	Gültigkeit	Methode	Messparameter	Versuch
Verbesserung der Informationsversorgung				
V1: Vermeidung von Informationsbeschaffung	objektiv	Messung	Aktualisierungszeit	Datenübertragung
V2: Verkürzung der Informationssuche	subjektiv	Befragung	Zustimmung	Real
V3: Beschleunigung der Informationserfassung	objektiv	Messung	Informationszeit*	Real, Labor
	subjektiv	Befragung	Zustimmung	Real, Labor
V4: Vereinfachung der Informationsinterpretation	objektiv	Messung	Fehlerrate	Real, Labor
	subjektiv	Befragung	Zustimmung	Real, Labor
Produktive Nutzung				
P1: geringer Vorbereitungsaufwand	objektiv	Messung	Erstellungszeit	Real, Labor
P2: geringer Nutzungsaufwand	objektiv	Messung	Interaktionszeit	Real, Labor
Akzeptanz				
A1: hohe Benutzerfreundlichkeit	subjektiv	Befragung	Zufriedenstellung	Real, Labor
A2: hohe Einsatztauglichkeit im Prozess	subjektiv	Befragung	Zustimmung	Real
A3: hohe Sicherheit	objektiv	Argumentation		Datenübertragung

*Zeit für Erfassung und Interpretation im Versuch nicht differenziert

13288

Abbildung 88: Übersicht über die Anforderungen und Zuordnung zu Versuchen, Messmethoden und -parametern

5.1 Eignungstests in Industrieszenarien

Zur Beurteilung ihrer Eignung kam die entwickelte digitale Arbeitsunterlage in zwei Versuchsreihen in realen Fertigungsszenarien zum Einsatz, die bereits in den Anwendungsbeispielen Erwähnung fanden: die Sektionsausrüstung im Schiffbau und die Schaltschrankmontage.

5.1.1 Schiffbau

Die Versuche fanden in einer an die reale Fertigung angelehnten Testumgebung statt. In insgesamt drei Durchläufen montierten die Versuchspersonen jeweils Ausrüstung mit einem Arbeitsumfang von insgesamt 16 Vorgabestunden. (Anmerkung: Diese beziehen sich auf die reale Fertigungsumgebung. Aufgrund der geringeren Größe und damit einhergehender kürzerer Wegezeiten überschätzt der Wert systematisch die tatsächlich benötigte Zeit in der Testumgebung.) Abbildung 89 zeigt die Testumgebung im ausgerüsteten, fertigen Zustand sowie die Ausrüstungseinzelteile auf Ladungsträgern.



13289

Abbildung 89: Ausgerüstete Testumgebung (links) und Arbeitsinhalt (rechts)

Versuchsdurchführung

Für eine möglichst gute Vergleichbarkeit montierten die Versuchspersonen in allen drei Durchläufen jeweils die gleichen Bauteile, allerdings an unterschiedlichen Positionen und in unterschiedlicher Ausrichtung, sodass sie in den späteren Durchläufen keinerlei Anhaltspunkte (bspw. Schweißstellen auf dem Stahl) zu Hilfe nehmen konnten. Abbildung 90 zeigt die Parameter der drei Versuchsdurchläufe.

Versuch	Versuchspersonen	Informationsmedium	Ausrichtungsvariation
R1	Mitarbeiter der Fertigung	Papierzeichnung	gespiegelt
	Mitarbeiter der Fertigung	digitale Arbeitsunterlage	original
R2	Auszubildende	digitale Arbeitsunterlage	verschoben

13290

Abbildung 90: Parameter der drei Versuchsdurchläufe im Schiffbau

Der erste Versuch (R1) diente zum Vergleich der beiden Informationsmedien Papierzeichnung und digitale Arbeitsunterlage. Um die Vergleichbarkeit zu erhöhen, montierten in beiden Durchläufen dieselben beiden erfahrenen Fertigungsmitarbeiter die Bauteile – einmal ausschließlich mit einer konventionellen Papierzeichnung und einmal mithilfe der digitalen Arbeitsunterlage. Um dabei zu vermeiden, dass die Versuchspersonen Informationen erinnerten, lagen zusätzlich zur Variation der Bauteilausrichtung sechs Monate zwischen den Durchläufen. Der zweite Versuch (R2) sollte zeigen, ob die digitale Arbeitsunterlage die Verständlichkeit der Informationen erhöht, und ob deren Umfang richtig gewählt ist. Hierzu fiel die Wahl der Versuchspersonen auf vier Auszubildende, jeweils zwei des ersten und des zweiten Lehrjahres. Diese verfügten zwar über genügend handwerkliche Kenntnisse, um die Montageaufgaben auszuführen, hatten aber aufgrund mangelnden Erfahrungswissens einen höheren Bedarf an Fertigungsinformationen als die ausgebildeten Mitarbeiter, die sich fehlende Informationen hätten selbstständig erschließen können.

Alle Versuchspersonen bekamen im Vorwege die Funktionsweise der digitalen Arbeitsunterlage an einem Beispielmodell erklärt und hatten etwa eine halbe Stunde Zeit, sich mit der Anwendung vertraut zu machen. Vier in der Testumgebung installierte Kameras nahmen den Montageprozess der ausgebildeten Mitarbeiter auf, um im Nachhinein über eine Produktivitätsanalyse per Zeitaufnahme [Tiet17, S. 66] die Einzeldauern der Mitarbeiteraktivitäten – insbesondere der Informationsphase – ermitteln zu können. Im Anschluss an den Versuch füllten die Teilnehmer einen Fragebogen zum Umgang mit der digitalen Arbeitsunterlage aus. Dieser enthielt Fragen zum Konzept, der Informationsdarstellung, der Zielgruppe und der Perspektive für digitale Arbeitsunterlagen, die die Mitarbeiter auf einer Skala mit *stimme nicht zu*, *stimme eher nicht zu*, *stimme eher zu* und *stimme zu* beantworten konnten (gewertet mit 0, 33, 67 bzw. 100 Prozent Zustimmung).

Auswertung

Es zeigte sich, dass die digitale Arbeitsunterlage sowohl für die Auszubildenden als auch für die erfahrenen Mitarbeiter als Informationsmedium geeignet ist. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass beide Personengruppen die Ausrüstungsbauteile vollständig und fehlerfrei einbauen konnten, und dass während der Versuche keinerlei Fragen zur Bedienung der Anwendung oder bezüglich unklarer Informationen aufkamen. Der Softwareprototyp erreichte geräteabhängig zwischen drei und fünf Stunden Akkulaufzeit und war damit in der Lage, eine Schicht bis zur regulären Pause abzudecken. Die Ergebnisse der Befragung sind in Abbildung 91 zu sehen und nach Auszubildenden und ausgebildeten Mitarbeitern aufgeschlüsselt. Abbildung 92 zeigt die Mitarbeiter bei der Arbeit mit der digitalen Arbeitsunterlage im AR-Modus.

Es zeigt sich, dass beide Gruppen insgesamt sehr zufrieden mit der digitalen Arbeitsunterlage als Informationsmedium sind und diese – bereits im ersten Versuch – gut bedienen können. Die Teilnehmer loben insbesondere die Informationsdarstellung im Vergleich zu

den Papierunterlagen. Über die Zielgruppe herrscht Uneinigkeit: Während die ausgebildeten Mitarbeiter die Unterlage ausschließlich als Unterstützung für sich und ihre Kollegen einschätzen, sehen die Auszubildenden sie auch als geeignetes Werkzeug, mit dessen Hilfe Meister ihre Mitarbeiter unterstützen können. Die Versuchsteilnehmer sehen die Perspektive für die Informationsversorgung tendenziell bei digitalen Arbeitsunterlagen.

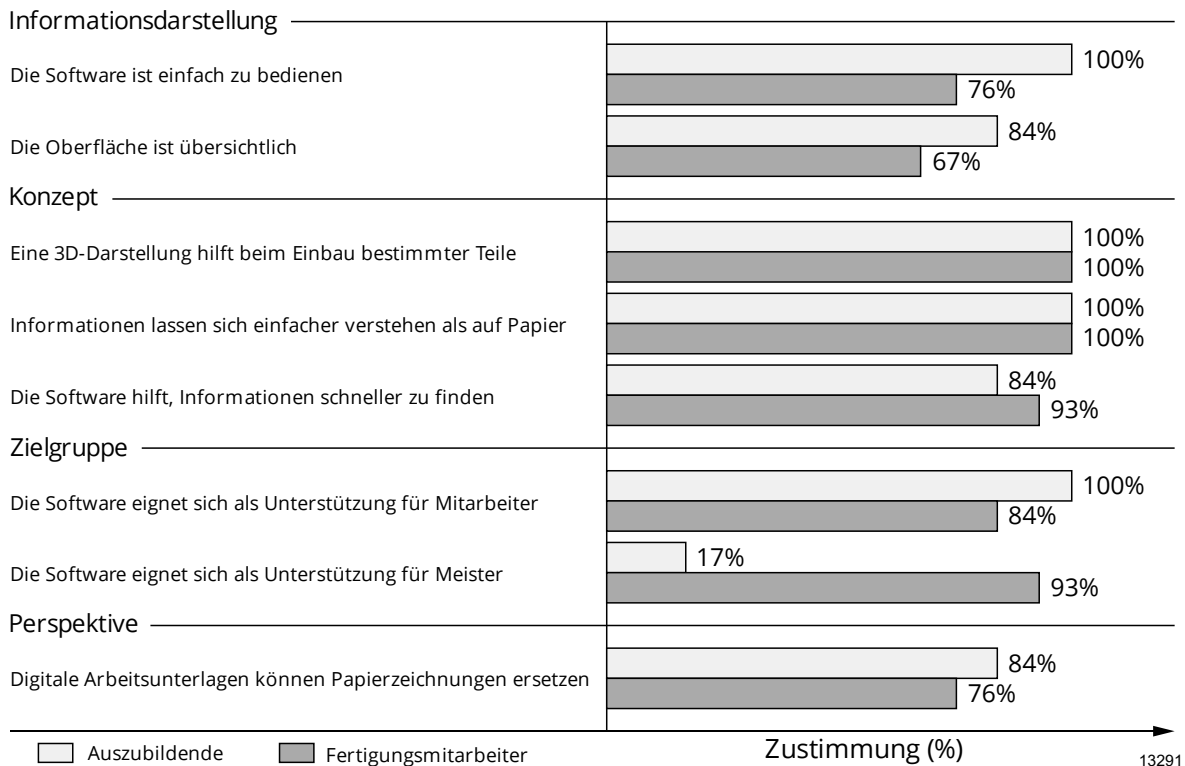
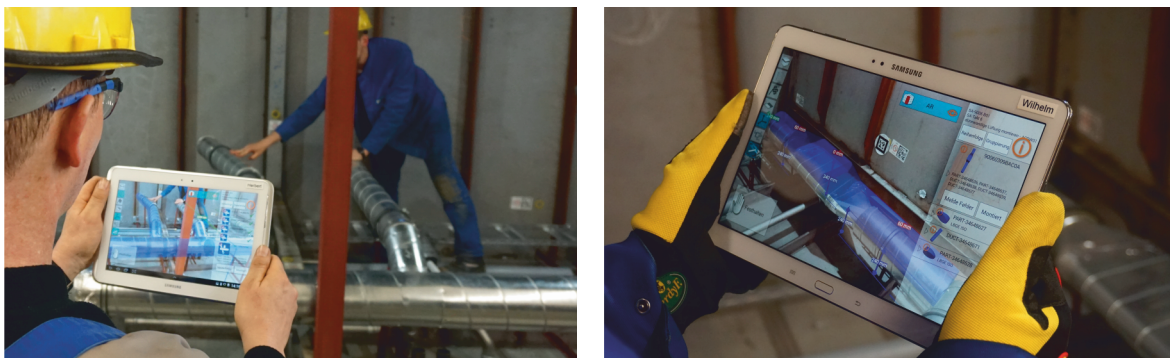


Abbildung 91: Ergebnisse der Befragung der insgesamt sechs Versuchsteilnehmer (vgl. [Hala15, S.77])

Die Ergebnisse der Produktivitätsanalyse sind hingegen vorsichtig zu bewerten, da sie aufgrund der einmaligen und erstmaligen Durchführung sowie der geringen Anzahl an Versuchspersonen nicht repräsentativ sind, und sich keine Aussage über die statistische Signifikanz treffen lässt. Dennoch ist eine Tendenz zu erkennen: Die Dauer der Informations-tätigkeiten sank von zwei Stunden mit Papierzeichnung auf rund anderthalb Stunden mit digitaler Arbeitsunterlage – eine Verbesserung von 25 Prozent.



13292

Abbildung 92: Fertigungsmitarbeiter beim Soll-Ist-Abgleich mit AR

Indirekte Bereiche

In einem weiteren Versuch (R3) fand eine grundsätzliche Betrachtung der Aufwände in den indirekten Bereichen, konkret der Planungsabteilung statt, die die Kompetenz für die Erstellung aller Papierzeichnungen innehat. Hierbei ergab sich ein Gesamtaufwand pro Sektion (durchschnittlich ca. 200 Stunden Arbeitsinhalt in den direkten Bereichen) zwischen acht und zwölf Stunden, von denen die Mitarbeiter zwischen drei und vier Stunden für die manuelle Erstellung von Zeichnungen aufwendeten. Friedewald et al. stellen einen Anteil von bis zu 40 Prozent für die Zeichnungserstellung fest [Frie16, S. 143]. Dieser ließe sich bei Verwendung einer digitalen Arbeitsunterlage größtenteils einsparen und durch eine automatisierte Übertragung der Arbeitspakete in die Datenbank ersetzen. Es entstünde hierbei kein zusätzlicher Aufwand durch die manuelle Aufbereitung von Daten für die digitale Arbeitsunterlage.

5.1.2 Schaltschrankmontage

Für den zweiten Anwendungsfall, die Schaltschrankmontage, fanden wiederum zwei Versuche statt [Bode15, S. 68ff.]. Die Versuchspersonen montierten und verdrahteten dabei einen exemplarischen Modellschaltschrank. Im Gegensatz zur Sektionsausrüstung waren die Testumgebung wesentlich kleiner und die Informationen und Bauteile weniger komplex.

Versuchsdurchführung

Wie zuvor gab es zwei Versuche: zwei Messungen mit Fertigungsmitarbeitern zum Vergleich der Informationsmedien (Versuch R4) und eine Messung mit fachfremden Studenten zur Überprüfung der Vollständigkeit der Informationen in der digitalen Arbeitsunterlage (Versuch R5). Abbildung 93 zeigt die Parameter der Versuche.

Versuch	Versuchspersonen	Informationsmedium	Umfang
R4	Mitarbeiter der Fertigung	Papierzeichnung	vollständiger Aufbau
	Mitarbeiter der Fertigung	digitale Arbeitsunterlage	vollständiger Aufbau
R5	Studenten	digitale Arbeitsunterlage	nur Verdrahtung

13293

Abbildung 93: Parameter der drei Versuchsdurchläufe in der Schaltschrankmontage

Da in den ersten beiden Durchläufen jeweils nur ein Mitarbeiter den Schaltschrank montierte, aufgrund der geringeren Dauer (ca. zwei Vorgabestunden Arbeitsinhalt) und der übersichtlichen Fertigungsumgebung, konnten die Prozessablaufanalysen zur Erfassung der Mitarbeiterzustände bereits während der Montage stattfinden.

Auswertung

Die Ergebnisse der Prozessablaufanalysen für beide Informationsmedien sind in Abbildung 94 dargestellt. Insgesamt verlief die Montage mithilfe der digitalen Arbeitsunterlage 16 Prozent schneller als anhand der konventionellen Papierzeichnungen.

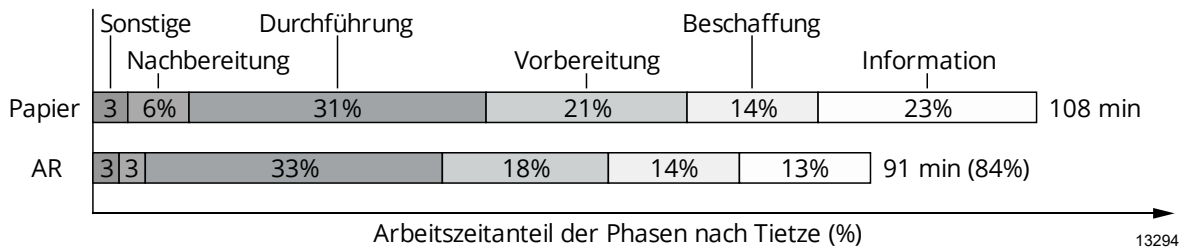


Abbildung 94: Ergebnisse der Prozessablaufanalysen in der Schaltschrankmontage [Bode15, S. 73]

Die Aufschlüsselung nach Prozessphasen zeigt, dass die Informationsphase zehn Prozentpunkte und damit um 40 Prozent schneller wird. Um jeweils drei Prozentpunkte beschleunigt die digitale Arbeitsunterlage die Vor- und Nachbereitung. In der Vorbereitung ist dieser Effekt darauf zurückzuführen, dass die Anwendung die zu wählende Drahtlänge direkt anzeigt, wodurch das Messen im Schaltschrank (Vorbereitungstätigkeit) entfällt. In der Nachbereitung können die Mitarbeiter die Fertigstellung aller Einzelschritte unmittelbar in der Anwendung bestätigen, anstatt sie schriftlich im Schaltplan festzuhalten.

Die Zahlen sind aufgrund der einzelnen Stichprobe wiederum vorsichtig zu bewerten, jedoch zeigt sich auch in der Schaltschrankmontage eine Tendenz zu einer Produktivitätssteigerung. Die an den Versuchen beteiligten Mitarbeiter äußerten sehr positives Feedback zur Bedienung und zur Informationsversorgung mit der digitalen Arbeitsunterlage.

Im zweiten Versuch (R5) verdrahteten Studenten den bereits vormontierten Schaltschrank unter Verwendung der digitalen Arbeitsunterlage. Hierbei zeigte sich, dass diese zur Vermittlung der Informationen genügte: Alle Studenten verdrahteten den Schaltschrank logisch richtig, die Ausführung war allerdings an vielen Stellen mangelhaft, was auf die fehlende handwerkliche Ausbildung der Versuchspersonen zurückzuführen ist. Eine digitale Arbeitsunterlage kann eine ausgebildete Fachkraft also nicht zwangsläufig durch eine weniger qualifizierte Person ersetzen. Mit den konventionellen Schaltplänen konfrontiert, gaben sich die Versuchsteilnehmer wenig zuversichtlich, überhaupt ein Ergebnis erzielen zu können.

Indirekte Bereiche

Die Analyse der indirekten Bereiche (Versuch R6), in diesem Fall der Konstruktionsabteilung, ergab einen geringfügigen Mehraufwand für die Aufbereitung von Informationen für die digitale Arbeitsunterlage [Bode15, S. 70]. Im Beispiel des Modellschaltschranks stieg der Aufwand im Vergleich zum Ist-Prozess um rund acht Minuten, in denen der Konstruk-

tionsmitarbeiter die Querschnitte und Farben der Leitungen hinterlegte. Dieser Mehraufwand fällt jedoch geringer aus als der Produktivitätsgewinn in der Fertigung. Zudem ist zu beachten, dass es sich pro Schaltschrank um einen einmaligen Aufwand handelt. Bei einer Fertigung von Kleinserien anstelle eines Unikats verliert dieser gegenüber dem Produktivitätsgewinn an Bedeutung.

5.2 Systematische Versuche in einer Laborumgebung

Die Versuche in der Realumgebung zeigen zwar die grundsätzliche Eignung der in dieser Arbeit entwickelten digitalen Arbeitsunterlage für die Informationsversorgung in der Fertigung sowie eine deutliche Tendenz zu Produktivitätssteigerungen, haben allerdings aufgrund des geringen Stichprobenumfangs keine statistische Signifikanz. Um zu signifikanten Aussagen zu kommen, bedarf es entsprechend größerer Stichprobenumfänge, die in beiden Realszenarien einen erheblichen materiellen und zeitlichen Aufwand erfordert hätten. Da in beiden Anwendungsbeispielen Fachkräfte notwendig sind, um die Montageaufgaben korrekt auszuführen, wäre eine derart umfangreiche Evaluation auch für die beteiligten Unternehmen eine zusätzliche Belastung.

Um dennoch signifikante Aussagen über Produktivitätsvorteile, Qualitätsverbesserungen, die Benutzeroberfläche und die Effektivität der Werkzeuge treffen zu können, fanden Laborversuche statt, deren Bearbeitung kein Fachwissen erforderte. In insgesamt fünf Versuchen nutzten die Versuchspersonen – Studenten und Doktoranden – verschiedene Informationsmedien, um LEGO-Modelle aufzubauen und zu überprüfen [Melu16, S. 55ff.]. Die Wahl fiel aus den folgenden Gründen auf das LEGO-Baustein-System:

- Aufgrund der Teilevielfalt und der Kombinationsmöglichkeiten eignet es sich sehr gut dazu, in kleinem Maßstab unterschiedliche Montageaufgaben aus der Unikatfertigung nachzuahmen.
- Aufgrund der hohen Bekanntheit von LEGO lässt sich auf eine umfangreiche Einweisung der Versuchspersonen in dessen Handhabung verzichten.
- LEGO- und DUPLO-Aufbauten fanden bereits in anderen Untersuchungen erfolgreich Anwendung (vgl. [Polv14, S. 147], [Tang03, S. 75]).
- Die fünf Phasen des generischen Arbeitszyklus lassen sich bei der Wahl von einfachen Bausteinen auf Informations- und Durchführungstätigkeiten reduzieren. Drei Phasen entfallen aufgrund des Versuchsaufbaus: die Material- und Hilfsmittelbeschaffung, da sich die Bauteile direkt am Arbeitsplatz befinden; die Bauteil- und Bauplatzvorbereitung, da weder Vorarbeiten an den Bauteilen noch Werkzeuge notwendig sind; die Nachbereitung, da die Montagetätigkeiten keine Säuberungs- oder Aufräumarbeiten nach sich ziehen. Die Montagezeit lässt sich via MTM auf knapp zwei Sekunden pro Baustein abschätzen [Bokr12, S. 482], womit sie gegenüber der Informationszeit zu vernachlässigen ist.

Abbildung 95 gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche und die jeweils ermittelten Zielgrößen (vgl. [Klep09, S. 10]) zur Bewertung und zum Vergleich der von den Probanden erzielten Ergebnisse. Hierbei kamen Zeit- und Fehlermessungen für die objektiven, und von den Probanden auszufüllende Fragebögen für die subjektiven Zielgrößen zum Einsatz. Die Versuche vergleichen jeweils drei Arten der Informationsdarstellung: konventionell mit einer technischen Papierzeichnung, per digitaler Arbeitsunterlage im CAD-Modus und per digitaler Arbeitsunterlage im AR-Modus. Die Durchführung und die Auswertung der Versuche sind in den folgenden Unterabschnitten jeweils im Detail beschrieben.

Versuch		Zielgröße	Methode
L1	Montage Vergleich: Papier, CAD, AR	Montagedauer	Zeitmessung
		Montagequalität	Fehlermessung
		Zufriedenheit	Befragung
L2	Qualitätskontrolle Vergleich: Papier, CAD, AR	Prüfdauer	Zeitmessung
		Prüfqualität	Fehlermessung
		Zufriedenheit	Befragung
L3	Benutzeroberfläche	Zufriedenheit	Befragung
L4	Werkzeug Bemaßung Vergleich: Aufbereitungsformen	Interpretationszeit	Zeitmessung
		Erstellungszeit	Zeitmessung
L5	Werkzeug Flugmodus Vergleich: mit/ohne	Interaktionszeit	Zeitmessung
		Zufriedenheit	Befragung
L6	Datenübertragung	Übertragungszeit	Zeitmessung
		Aktualisierungszyklus	Zeitmessung

13295

Abbildung 95: Überblick über die Laborversuche und die jeweils eingesetzten Messmethoden

5.2.1 Statistische Betrachtung

Die Auswertung der Versuchsergebnisse beruht auf den folgenden statistischen Annahmen:

- Die Zielgrößen folgen einer Normalverteilung.
- Die Zielgrößen können unterschiedliche Varianzen haben.
- Die Stichprobenanzahl zweier zu vergleichender Versuchsgruppen ist gleich.

Es gilt ein Signifikanzniveau α von fünf Prozent: Die getroffenen statistischen Aussagen sind jeweils mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit korrekt.

Signifikanz

Zur Auswertung der vergleichenden Versuche (L1, L2, L4 und L5) kamen einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) [Bort10, S. 205ff.] zum Einsatz, um die Effekte der Einflussgrößen (i. e. der drei Informationsmedien) auf Signifikanz zu untersuchen, sowie Zweistichproben-t-Tests [Stud08, S. 13ff.], um das Abschneiden zweier Informationsmedien in Relation zu setzen. Da der t-Test nur einen paarweisen Vergleich der Gruppen (Papier, CAD und AR) erlaubt, sind pro Experiment und Zielgröße drei t-Tests notwendig – es handelt sich um multiples Testen, das nach einer Korrektur des Signifikanzniveaus verlangt [Bort10, S. 229ff.]. Hierzu kommt die Bonferroni-Holm-Prozedur zum Einsatz [Holm79, S. 65ff.], nach der sich für die drei t-Tests – in aufsteigender Reihenfolge ihrer Irrtumswahrscheinlichkeit – die angepassten Signifikanzniveaus $\alpha/3$, $\alpha/2$ bzw. α ergeben. Hierüber lassen sich Aussagen gewinnen wie:

„CAD senkt die Bearbeitungsdauer gegenüber Papier“.

In der Auswertung finden die Verfahren Anwendung, um signifikante Unterschiede zwischen Informationsmedien festzustellen.

Quantitative Aussagen

Um signifikante Unterschiede zwischen den Informationsmedien hinsichtlich einer Zielgröße quantifizieren zu können, sind weitere Betrachtungen notwendig. Diese sind beispielhaft am Vergleich der Bearbeitungsdauer von Papier (Referenzmedium) und digitaler Arbeitsunterlage im CAD-Modus (Vergleichsmedium) bei hoher Komplexität und mithilfe der folgenden Formelzeichen erklärt.

$$\mu_{x,y} = \mu_x - \mu_y \quad (11)$$

$\mu_{x,y}$	Differenz der Mittelwerte für Informationsmedien x und y
μ_x	Mittelwert für das zum Vergleich stehende Informationsmedium x
μ_y	Mittelwert für das Referenz-Informationsmedium y
$I_x = [u_x, o_x]$	Konfidenzintervall des Mittelwerts für Informationsmedium x
$I_{x,y} = [u_{x,y}, \infty[$	einseitiges Konfidenzintervall für die Differenz der Mittelwerte

Abbildung 96 zeigt die angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen und die daraus berechneten 95-Prozent-Konfidenzintervalle [Gens06, S. 155] I_{CAD} und I_{Papier} für die Mittelwerte von CAD-Modus bzw. Papier.

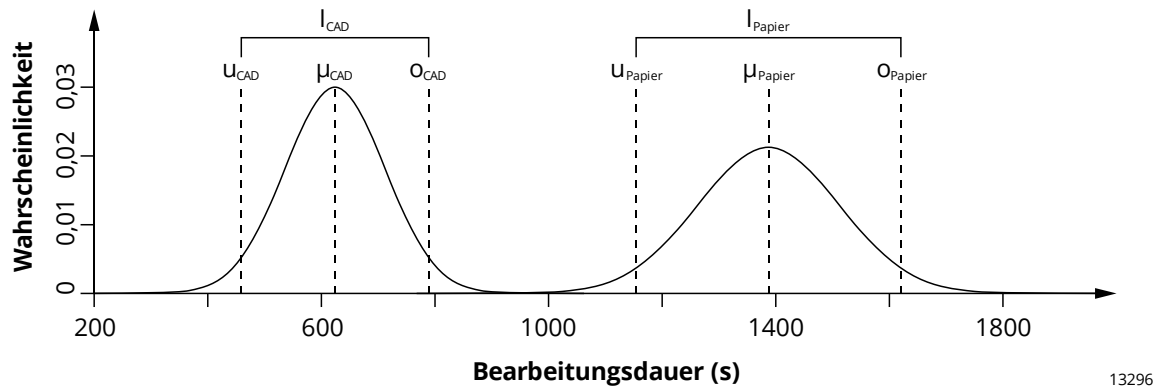


Abbildung 96: 95-Prozent-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der Bearbeitungsdauern im CAD-Modus und mit Papier

Beide Informationsmedien anhand ihrer Mittelwerte μ_{CAD} und μ_{Papier} zu vergleichen, würde die statistisch nicht belastbare Aussage hervorbringen, die Bearbeitungsdauer sei im CAD-Modus rund 760 Sekunden schneller als mit Papier. Die Differenz der benachbarten Intervallgrenzen o_{CAD} und u_{Papier} liefert hingegen eine zu konservative Abschätzung (rund 360 Sekunden). Nach Polasek [Pola97, S. 53] lässt sich jedoch ein Konfidenzintervall $I_{CAD,Papier}$ für die Differenz der Mittelwerte bestimmen. Da vorrangig die minimale Differenz zum Vergleich der Informationsmedien relevant ist, genügt ein einseitiges Konfidenzintervall. Für das Beispiel ist dieses in Abbildung 97 dargestellt.

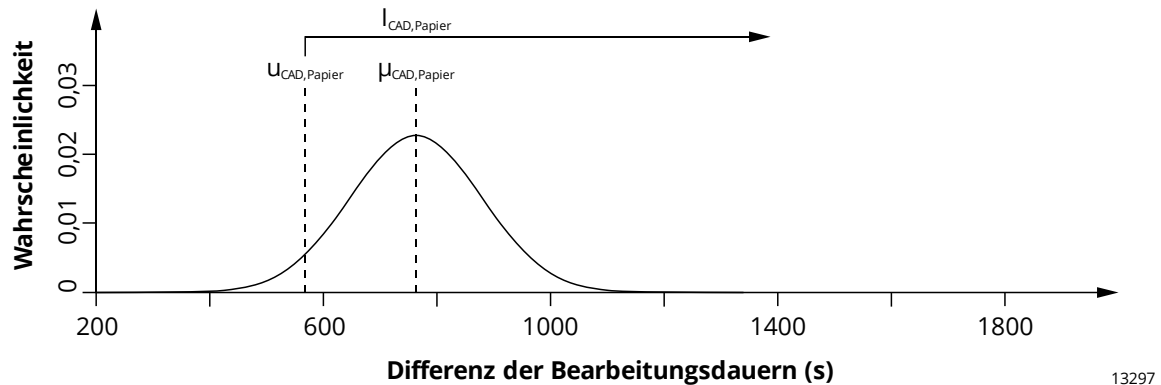


Abbildung 97: 95-Prozent-Konfidenzintervall der Differenz beider Mittelwerte

Die minimal erzielbare Differenz beträgt damit $u_{CAD,Papier}$. Die Auswertung verwendet die Betrachtung des Konfidenzintervalls der Mittelwerte, um eine absolute Differenz zwischen den Informationsmedien anzugeben und Aussagen treffen zu können wie:

„CAD senkt die Bearbeitungsdauer gegenüber Papier um mindestens 570 Sekunden“.

In den vergleichenden Versuchen finden die Verfahren Anwendung, um signifikante Unterschiede in der Zufriedenheit der Versuchspersonen zu quantifizieren.

Relative quantitative Aussagen

Ein relativer Vergleich der Informationsmedien ließe sich zwar durch die Bildung eines Quotienten aus den zuvor bestimmten $\mu_{x,y}$ und der Obergrenze des Konfidenzintervalls des Referenzmediums ziehen – in diesem Fall Papier. Dieses Vorgehen ist jedoch sehr konservativ. Eine bessere Abschätzung ergibt sich aus dem Konfidenzintervall für den Quotienten der Mittelwerte [Chak71, S. 89] [Sach06, S. 269]:

$$\mu_{x/y} = \frac{\mu_x}{\mu_y} \quad (12)$$

$\mu_{x/y}$ Quotient der Mittelwerte für Informationsmedien x und y

$I_{x/y} = [\mu_{x/y}, \infty[$ einseitiges Konfidenzintervall für den Quotienten der Mittelwerte

Die Untergrenze des einseitigen Konfidenzintervalls $\mu_{CAD/Papier}$ liefert relative Aussagen wie:

„CAD senkt die Bearbeitungsdauer gegenüber Papier um mindestens 43 Prozent“.

Das Verfahren findet in den vergleichenden Versuchen Anwendung, um signifikante Unterschiede in Bearbeitungszeiten, Interaktionsschritten und der Fehlerrate zu quantifizieren.

5.2.2 Montage

Im ersten Versuch (L1) montierten die Probanden LEGO-Modelle in drei Komplexitätsstufen, siehe Abbildung 98. Diese unterschieden sich in

- der Anzahl der Ebenen, d. h. der maximal übereinanderliegenden Bauteile, die in technischen Zeichnungen in einer Draufsicht schwierig zu erkennen sind,
- der Bauteilanzahl – steigt diese, wird die Informationsdarstellung in technischen Zeichnungen tendenziell unübersichtlich – und
- der Teilevielfalt, die von den Versuchspersonen Konzentration bei der Zuordnung zwischen der Repräsentation des Bauteils auf dem Informationsmedium und dessen realem Aussehen erfordert.

Die gemessenen Zielgrößen waren die Montagedauer, die Montagequalität sowie die Zufriedenheit der Probanden mit dem Informationsmedium. Um zu verhindern, dass sich die Probanden einen Vorteil bei der Platzierung der Bauteile auf der Grundplatte verschafften, indem sie anstatt die angegebenen Maße zu verwenden, im LEGO-Raster abzählten, ist das Raster der Grundplatte in allen Arbeitsunterlagen weggelassen.

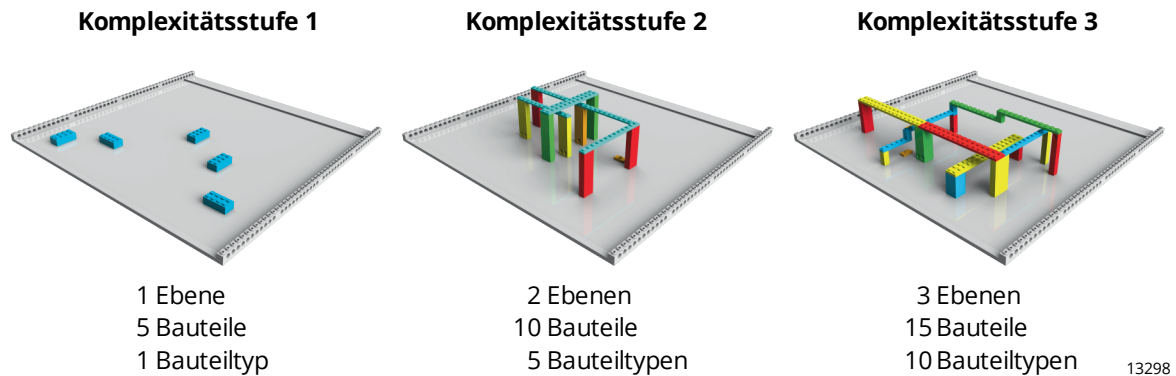


Abbildung 98: LEGO-Modelle in drei Komplexitätsstufen; die Farben dienen der Verdeutlichung der einzelnen Bauteile, diese waren in den Versuchen grau

Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn erhielten die Teilnehmer eine kurze Einweisung in die Aufgabenstellung, den Aufbau der Papierzeichnung und die Funktionsweise der digitalen Arbeitsunterlage und erprobten den Aufbau anhand eines separaten LEGO-Modells. Daraufhin führten die insgesamt 15 Versuchspersonen jeweils drei Montageaufgaben mit unterschiedlichen Komplexitätsstufen und unterschiedlichen Informationsmedien durch. Die Reihenfolgen und Zuordnungen waren dabei jeweils unterschiedlich, sodass sich pro Komplexitätsstufe und Informationsmedium fünf Stichproben ergeben.

Im Anschluss an die Montageaufgaben füllten die Versuchspersonen jeweils einen Fragebogen aus, auf dem sie ihre Zufriedenheit mit dem Informationsmedium für die Montageaufgabe äußern konnten.

Auswertung

Die Ergebnisse des Versuchs stellt Abbildung 99 dar. Für die Zielgrößen sind jeweils der Mittelwert und die Spannweite dargestellt. Für jede Komplexitätsstufe und Zielgröße fanden drei paarweise Vergleiche statt: Papier zu CAD, Papier zu AR sowie CAD zu AR, für die bei signifikantem Unterschied jeweils die Minstdifferenz, i. e. die Untergrenze des 95-Prozent-Konfidenzintervalls dargestellt ist.

Es lassen sich die folgenden Aussagen treffen:

- Bei niedriger Komplexität bringt die digitale Arbeitsunterlage keine messbaren Vorteile gegenüber Papierzeichnungen. Der AR-Modus ist hierbei mindestens 23 Prozent langsamer als Papier und 27 Prozent langsamer als CAD.
- Bei mittlerer Komplexität entsteht eine Tendenz zugunsten der digitalen Arbeitsunterlage, die sich messbar in der Zufriedenheit der Probanden niederschlägt: Der CAD-Modus schneidet mindestens 1,6 Bewertungspunkte, der AR-Modus mindestens 1,3 Bewertungspunkte besser ab als die Papierzeichnung.

- Bei hoher Komplexität zeigen sich die Vorteile der digitalen Arbeitsunterlage deutlich: Die Bearbeitungsdauer reduziert sich gegenüber der Papierzeichnung um mindestens 26 Prozent bei Verwendung von AR und um mindestens 43 Prozent bei Verwendung von CAD. AR ist dabei um mindestens acht Prozent langsamer als CAD.
- Durch AR lässt sich die Fehlerquote bei hoher Komplexität um mindestens 66 Prozent senken.
- Die Probanden sind bei hoher Komplexität mit AR mindestens 1,8 Bewertungspunkte, mit CAD mindestens 1,6 Bewertungspunkte zufriedener als mit der Papierzeichnung, die deutlich im negativen Bereich liegt.

Zusammenfassend eignet sich die digitale Arbeitsunterlage besonders bei Aufgaben höherer Komplexität. Während der CAD-Modus vor allem die Bearbeitungszeit verringert, führt die Nutzung des AR-Modus zu einer Fehlerreduktion. Bemerkenswert ist zudem, dass der komplexe Aufbau anhand einer Papierzeichnung keinem Probanden fehlerfrei gelang. Insgesamt sind diese mit der digitalen Arbeitsunterlage zufriedener als mit Papierzeichnungen.

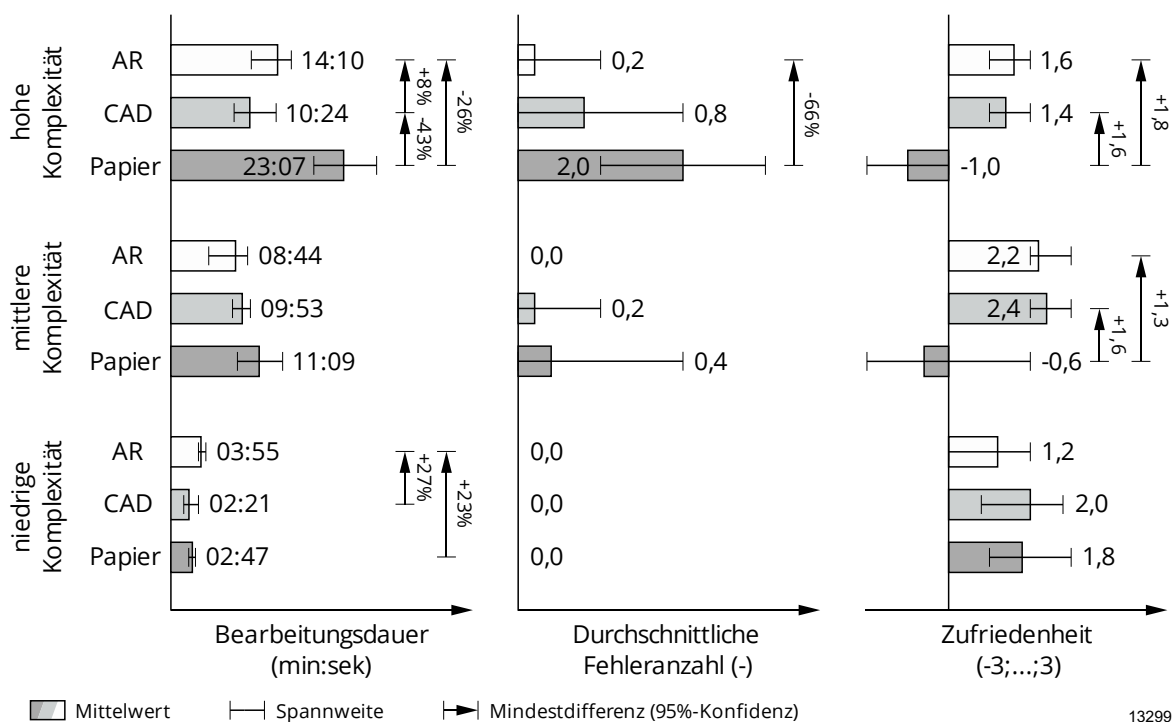
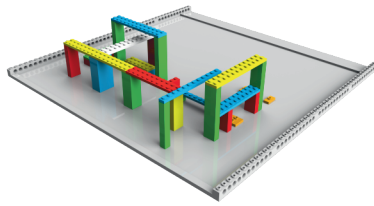


Abbildung 99: Auswertung der Ergebnisse in Versuch L1 (vgl. [Frie16, S. 152])

5.2.3 Qualitätskontrolle

Im zweiten Versuch (L2) überprüfte jeder der insgesamt 15 Probanden ein fehlerbehaftetes komplexes LEGO-Modell mit einem der drei Informationsmedien, das den korrekten Aufbau darstellte. Es ließen sich dabei bis zu zwölf Fehler finden: drei Positionierungsfehler, drei Ausrichtungsfehler, drei fehlende sowie drei falsche Bauteile (siehe Abbildung 100).



Modell für Qualitätskontrolle

- 3 falsch positionierte Bauteile
- 3 falsch ausgerichtete Bauteile
- 3 fehlende Bauteile
- 3 falsche Bauteiltypen

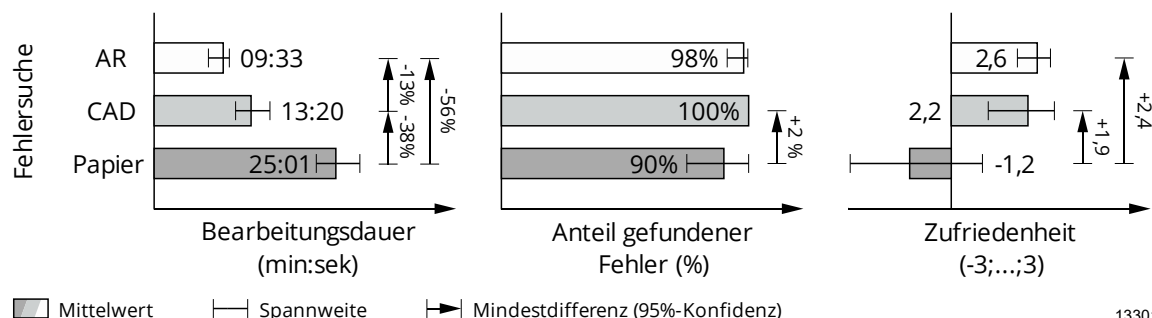
13300

Abbildung 100: LEGO-Modell für die Qualitätskontrolle

Die Versuchspersonen erhielten die Aufgabe, das Modell vollständig zu überprüfen, gefundene Fehler (Bauteilnummer und Fehlerart) in eine Liste einzutragen und die Kontrolle zu beenden, sobald sie der Meinung waren, alle Fehler gefunden zu haben. Die Anzahl sowie die Verteilung der Fehler waren ihnen dabei unbekannt. Die aufgenommenen Zielgrößen waren hierbei die Prüfdauer, die Prüfqualität (Anteil der korrekt identifizierten Fehler) sowie die Zufriedenheit mit dem Informationsmedium für die Aufgabe, die die Probanden im Anschluss an den Versuch auf Fragebögen angaben.

Auswertung

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abbildung 101 analog zu den vorangegangenen Diagrammen dargestellt.



13301

Abbildung 101: Auswertung der Ergebnisse in Versuch L2 (vgl. [Frie16, S. 152])

Folgende Aussagen lassen sich auf Basis der Ergebnisse treffen:

- Mit AR sinkt die Dauer der Fehleranalyse um mindestens 56 Prozent, mit CAD um mindestens 38 Prozent gegenüber der Papierzeichnung. AR ist dabei um mindestens 13 Prozent schneller als CAD.
- Die Anzahl der gefundenen Fehler ist zumindest mit CAD um zwei Prozent höher als mit der Papierzeichnung. Die Aussage, dass sich mit AR mehr Fehler finden lassen als mit Papierzeichnungen, ist zunächst aufgrund des wegen multiplen Testens verringerten Signifikanzniveaus zurückzuweisen, ließe sich jedoch möglicherweise mit einer größeren Stichprobenmenge zeigen, da sich auch ein Unterschied zwischen AR und CAD nicht nachweisen lässt.
- Die Zufriedenheit der Teilnehmer mit dem Informationsmedium zeigt CAD und AR mit 1,9 bzw. 2,4 Bewertungspunkten klar im Vorteil gegenüber Papierzeichnungen.

Insgesamt präsentiert sich der AR-Modus als beste Lösung für die Fehleranalyse komplexer Aufbauten.

5.2.4 Benutzeroberfläche

Versuch L3 überprüft die Zufriedenheit der Benutzer mit der Bedienoberfläche der Anwendung anhand des Fragebogens aus der ISO-Norm 9241-S, der sich als eine der am weitesten verbreiteten Methoden zur Feststellung der Software-Usability etabliert hat [Fig109, S. 1]. Er enthält insgesamt 21 Fragen zu sieben Kategorien, die auf einer siebenstufigen Skala (-3 bis +3) zu beantworten sind. Hierzu bauten die Probanden zunächst das LEGO-Modell mittlerer Komplexität (vgl. Versuch L1) anhand der digitalen Arbeitsunterlage auf, wobei alle Probanden sowohl den CAD- als auch den AR-Modus verwendeten, und füllten im Anschluss den Fragebogen aus.

Auswertung

Abbildung 102 zeigt die Ergebnisse des Versuchs. Die Fragen sind dabei jeweils entsprechend ihrer Kategorien zusammengefasst.

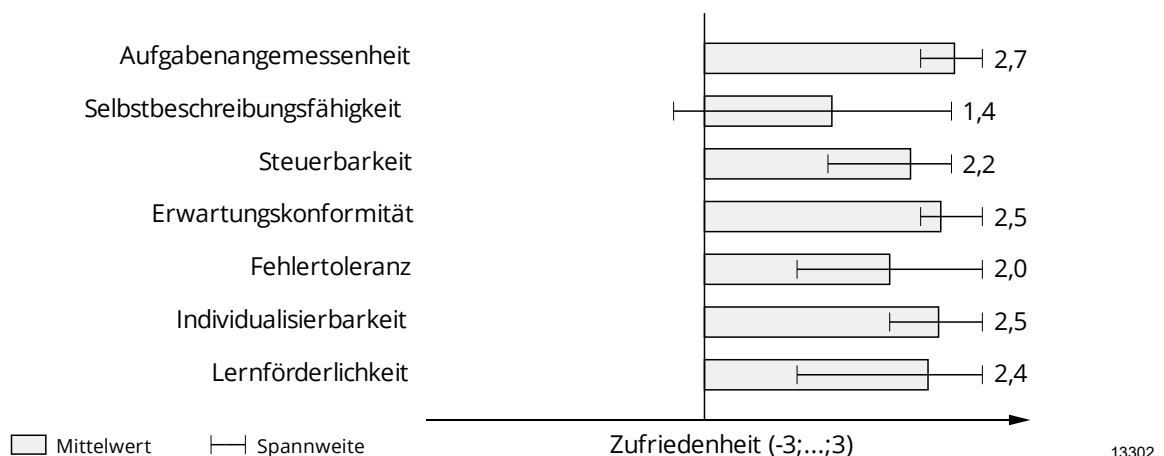


Abbildung 102: Auswertung der Ergebnisse in Versuch L3 (vgl. [Melu16, S. 77])

Es ergibt sich eine durchschnittliche Bewertung der Benutzeroberfläche von 2,23 Punkten, was 87 Prozent der maximal möglichen Punktzahl entspricht. Verbesserungsbedarf, der sich allerdings aus dem Prototyp-Status der Anwendung erklärt, besteht in der Selbstbeschreibungsfähigkeit, die sich bspw. durch deutlichere Rückmeldungen an den Benutzer erhöhen ließe. Eine Funktion zum Rückgängigmachen der letzten Aktion könnte die Fehlertoleranz der Anwendung steigern.

5.2.5 Bemaßungswerkzeug

Versuch L4 untersucht die Eignung des Werkzeugs zur automatischen Bemaßung, das Daten für die Darstellung von Bemaßung aufbereitet und damit sowohl in direkten als auch in indirekten Bereichen Arbeitsschritte einsparen soll (vgl. Abschnitt 4.4.1). Es stehen vier Methoden zum Vergleich, mit denen die Information *Maß* aus den indirekten Bereichen (i. e. aus den Konstruktionsdaten) in die direkten Bereiche (i. e. in das Kurzzeitgedächtnis des Mitarbeiters) gelangt:

- Ein Mitarbeiter der indirekten Bereiche erzeugt die Bemaßungen in einer CAD-Software. Sie erscheinen auf der ausgedruckten Zeichnung, aus der ein Fertigungsmitarbeiter sie abliest.
- Die Zeichnungen sind in einem vorgegebenen Maßstab gedruckt, auf der ein Fertigungsmitarbeiter sie mit einem Maßstabslineal ausmisst.
- Der Mitarbeiter der Fertigung verwendet ein herkömmliches digitales Bemaßungswerkzeug, mit dem er zwei Bauteile auswählt, deren orthogonale Distanz ihm das Werkzeug anzeigt.
- Die digitale Arbeitsunterlage zeigt dem Mitarbeiter im aktuellen Arbeitsschritt automatisch erzeugte Bemaßungen zwischen dem jeweils zu montierenden Bauteil und Referenzbauteilen an.

Für eine Entscheidung über die Aufbereitung der Bemaßungsinformation sind die Zeit für die Informationserstellung in den indirekten Bereichen sowie die Zeit für die Informationsinterpretation in den direkten Bereichen ausschlaggebend (vgl. Abschnitt 4.2.2). Diese dienen im Versuch als Zielgrößen.

Durchführung

Zur Bestimmung der Zeiten führten sechs Versuchspersonen in unterschiedlichen Reihenfolgen für das einfache LEGO-Modell (vgl. Versuch L1) die folgenden Aufgaben aus:

- im CAD-Programm Bemaßungen erstellen
- Maße in einer Papierzeichnung ablesen
- Maße in einer Papierzeichnung ausmessen
- Maße mit einem 3D-Messwerkzeug bestimmen
- automatisch erzeugte Bemaßung in der digitalen Arbeitsunterlage ablesen

Auswertung

In Abbildung 103 sind die Ergebnisse des Versuchs anhand der Mittelwerte und Spannweiten dargestellt. Zusätzlich sind die Gesamtkosten für die vier Methoden pro Maß auf Basis folgender Annahmen dargestellt: Das durchschnittliche Bruttogehalt für Metallhandwerker beträgt 2533 €/Monat [IGMe15a], das für Ingenieure 5031 €/Monat [IGMe15b], jeweils bei einer 35-Stunden-Woche; es fallen Lohnnebenkosten von 21 Prozent an [Lenk13, S. 4].

Es zeigt sich, dass das Ablesen der Maße – unabhängig vom Informationsmedium – die schnellste Methode ist. Bei der Aufbereitung der Maße für die technische Zeichnung entsteht allerdings ein erheblicher Aufwand, der unter Berücksichtigung des höheren Gehalts die Methode zur kostenintensivsten macht. Bei Verwendung von Papier als Informationsmedium ist es dementsprechend kostengünstiger, wenn die Mitarbeiter die Maße in der Zeichnung ausmessen. In den Versuchen ergaben sich hieraus jedoch im Mittel Abweichungen von 3,3 Prozent zum korrekten Maß.

Eine Darstellung der Maße auf mobilen Endgeräten ist also sowohl kostengünstiger als auch genauer als die Darstellung auf Papier. Die automatische Erzeugung und arbeitsschrittbezogene Einblendung geht als beste der Varianten aus dem Versuch hervor – sie verursacht mindestens 51 Prozent weniger Zeitaufwand und Kosten als das manuelle Messen in 3D und mindestens 78 Prozent weniger als das Messen in der Zeichnung. Gegenüber der manuellen Erzeugung der Bemaßung in den indirekten Bereichen lassen sich mindestens 85 Prozent der Kosten einsparen.

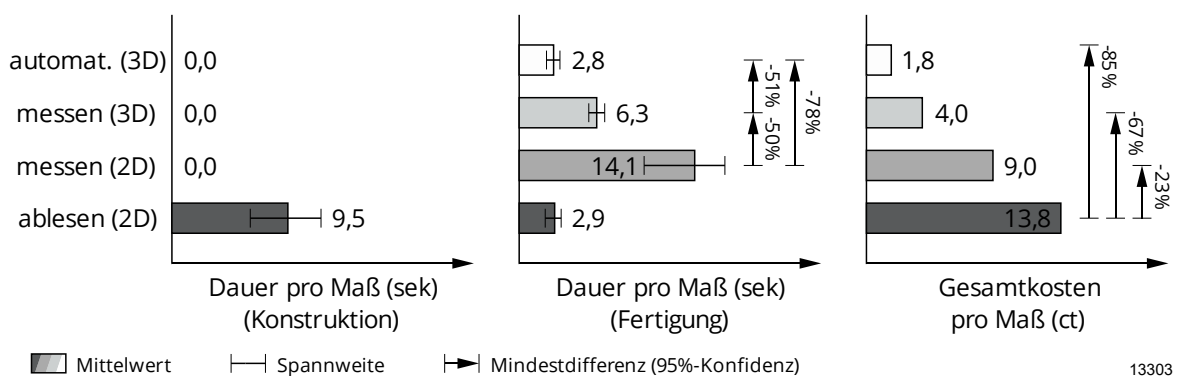


Abbildung 103: Auswertung der Ergebnisse in Versuch L4 (vgl. [Melu16, S. 79])

5.2.6 Flugmodus-Werkzeug

Der zweite Versuch zum Einsatz von Werkzeugen in der digitalen Arbeitsunterlage überprüft, ob der Flugmodus Produktivitätsvorteile im Umgang mit der Software bietet. Hierzu montierten insgesamt zehn Versuchspersonen das einfache LEGO-Modell (vgl. Versuch L1) mit der digitalen Arbeitsunterlage im CAD-Modus – entweder mit oder ohne Flugmodus. Als Zielgrößen dienten hierbei die durchschnittliche Anzahl an Interaktionsschritten zum Einstellen einer Ansicht sowie die dafür benötigte Zeit, die die digitale Arbeitsunterlage direkt protokollierte.

Auswertung

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abbildung 104 dargestellt. Während die Probanden mit Flugmodus im Durchschnitt drei Sekunden bzw. 1,6 Interaktionsschritte pro Bauteil benötigten, um eine geeignete Ansicht einzustellen, waren sie ohne Flugmodus mit rund 20 Sekunden und 9,4 Interaktionsschritten wesentlich langsamer – und zugleich erheblich unzufriedener.

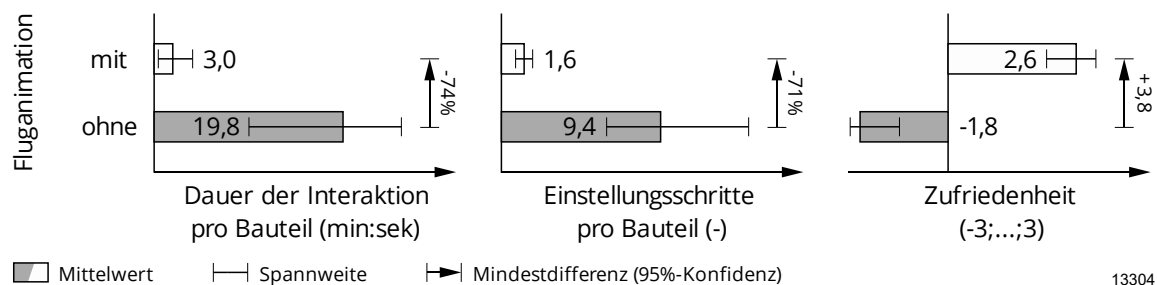


Abbildung 104: Auswertung der Ergebnisse in Versuch L5 (vgl. [Melu16, S. 78])

Es lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Mit Flugmodus sinkt die Interaktionszeit um mindestens 74 Prozent.
- Die Anzahl der Interaktionsschritte reduziert sich um mindestens 71 Prozent.
- Die Zufriedenheit steigt um mindestens 3,8 Bewertungspunkte.

5.2.7 Datenübertragung

Wenn die indirekten Bereiche die relevanten Daten auf dem Server bereitstellen, bestimmt die Datenübertragungsrate zwischen dem Server und den mobilen Endgeräten in Relation zu der zu übertragenden Datenmenge die Datenverfügbarkeit und -aktualität. In beiden Anwendungsbeispielen, der Sektionsausrüstung im Schiffbau und der Schaltschrankmontage, ist davon auszugehen, dass die durchschnittlich pro Arbeitspaket zu übertragende Datenmenge 100 bzw. 20 MB nicht überschreitet und maximal 100 bzw. 25 Mitarbeiter Daten abrufen. Abbildung 105 zeigt die Ergebnisse des Datenübertragungsversuchs [Brit16, S. 96ff.] für beide Anwendungsbeispiele unter der Worst-Case-Annahme, dass alle Mitarbeiter gleichzeitig ihre Arbeitsinhalte anfordern. Hierbei ist zwischen den primären und sekundären Inhalten (vgl. Abschnitt 4.6.6) unterschieden. Die minimale Übertragungsdauer gilt, sofern alle Mitarbeiter dieselben Inhalte anfordern und der serverseitige Cache den Datenzugriff beschleunigen kann. Die maximale Übertragungsdauer gilt, sofern es keine Überschneidung gibt, was zwangsläufig der Fall ist, wenn der Server zunächst nur primäre Inhalte überträgt.

	Schiffbau	Schaltschrankmontage
Randbedingungen		
Netzabdeckung	vollständig	vollständig
Mitarbeiteranzahl	100	25
Arbeitspaketvergabe	synchron	asynchron
sekundäre Inhalte	viele	wenige
Daten		
Datenmenge pro Mitarbeiter	100 MB	20 MB
davon primäre Inhalte	10 MB	10 MB
Übertragungsdauer (mm:ss)		
minimal für alle Inhalte	10:00	00:30
maximal für alle Inhalte	14:00	00:42*
maximal für aktive Inhalte	01:24*	00:21
*relevante Übertragungsdauer für die jeweils ausgewählte Strategie		13305

Abbildung 105: Datenübertragungsdauern in den Anwendungsbeispielen

Aus der Abbildung lassen sich für beide Anwendungsbeispiele die Übertragungsstrategien herleiten: Um in der Sektionsausrüstung des Schiffbaus Wartezeiten für die Mitarbeiter zu Beginn der Schicht zu vermeiden, sollte der Server zunächst nur die primären Inhalte übertragen und die sekundären Inhalte bei Bedarf. In der Schaltschrankmontage ist die Übertragungsdauer unkritisch, sodass auch die sofortige Übertragung aller Inhalte in Frage kommt. Die Verfügbarkeit aller relevanten Daten lässt sich also in beiden Anwendungsbeispielen sicherstellen. Die Datenaktualität ist gewährleistet, sofern eine vollständige Netzabdeckung im Fertigungsbereich möglich, und ein angemessenes Abfrageintervall (bspw. fünf Minuten) auf den mobilen Endgeräten eingestellt ist.

5.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Evaluation in insgesamt elf Versuchen konnte bestätigen, dass das vorgestellte Konzept für eine AR-gestützte Informationsversorgung die zuvor aufgestellten Anforderungen erfüllt. Abbildung 106 zeigt einen Überblick und ordnet die Überprüfung der Anforderungen den Versuchen zu.

Alle Evaluationsdurchläufe zeigen den klaren Vorteil einer Informationsversorgung mit der entworfenen Anwendung auf. Die Laborversuche beziffern den Produktivitätsgewinn bei komplexen Aufbauten auf rund 30 Prozent in der Informationsphase. Bei einem in der Unikatfertigung üblichen Anteil der Informationstätigkeiten von 25 bis 30 Prozent an der Gesamtarbeitszeit ergäbe sich insgesamt ein Produktivitätsgewinn von mindestens sieben bis neun Prozent. Die vorgestellten und erweiterbaren Werkzeuge gewährleisten, dass dem

Produktivitätsgewinn kein nennenswerter Zusatzaufwand in den indirekten Bereichen entgegensteht. Die Fehlerrate sinkt ebenfalls drastisch. Die hierdurch gesparten Kosten lassen sich nur individuell pro Anwendungsfall berechnen, da sie maßgeblich von der Schwere des Fehlers und Zeitpunkt der Behebung abhängen.

Versuchsreihe	Versuch	Methode	V1	V2	V3	V4	P1	P2	A1	A2
Sektions- ausrüstung	R1	Montageinformationen			☒	☒		☒		
		Befragung			☒	☒			☒	☒
	R2	Vollständigkeit				☒				
		Befragung		☒	☒	☒			☒	☒
	R3	Informationsaufbereitung					☒			
	R4	Montageinformationen			☒	☒		☒		
Schaltschrank- montage	R5	Vollständigkeit				☒				
	R6	Informationsaufbereitung					☒			
Laborversuche	L1/L2	Montageinformationen, Qualitätskontrolle			☒	☒		☒		
		Fehlermessung				☒				
		Befragung			☒	☒			☒	
	L3	Benutzeroberfläche							☒	
	L4	Werkzeug Bemaßung			☒		☒	☒		
	L5	Werkzeug Flugmodus						☒		
		Befragung							☒	
	L6	Datenübertragung		☒						
V1: Informationsbeschaffung		P1: Vorbereitungsaufwand		☒ = Anforderung erfüllt						
V2: Informationssuche		P2: Nutzungsaufwand								
V3: Informationserfassung		A1: Benutzerfreundlichkeit								
V4: Informationsinterpretation		A2: Einsatztauglichkeit								

13306

Abbildung 106: Übersicht über die durchgeführten Versuche und die darin bewerteten Anforderungen

Der Einsatz einer Informationsversorgung mit mobilen Endgeräten ist also grundsätzlich dann lohnenswert, wenn ein hoher Anteil an Informationstätigkeiten vorliegt. Die Laborversuche zeigen einen Unterschied zwischen AR- und CAD-Modus und werfen die Frage auf, wann der Einsatz von AR angezeigt ist, und wann eine intelligente CAD-Anzeige genügt, die sich in einem Unternehmen vor allem im Hinblick auf das für AR notwendige Tracking schneller umsetzen ließe. Die Ergebnisse zeigen, dass sich auch allein mit dem CAD-Modus Produktivitätsgewinne erzielen lassen – allerdings nur, solange sich der Arbeitsinhalt auf die Fertigung oder Montage eines Produkts oder Produktteils beschränkt. Ist eine Fehlerkontrolle Bestandteil des Arbeitsprozesses, oder besteht allgemein der Wunsch, mit dem Einsatz digitaler Informationsversorgung die Fehlerrate zu reduzieren, ist die AR-Darstellung überlegen.

6 Schlussbetrachtung

6.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Informationsversorgung in produzierenden Unternehmen, die sich auf Unikatprodukte spezialisiert haben. Es zeigt sich hierbei, dass die derzeit vorherrschende Form der Informationsversorgung in den direkten Bereichen – das statische Medium Papier – wesentliche Nachteile aufweist, die zu Produktivitätseinbußen und vermeidbaren Fehlern führen.

Das Konzept einer digitalen Arbeitsunterlage zeigt in einem umfassenden Ansatz auf, wie sich der derzeitige Zustand verbessern lässt. Der Ansatz betrachtet dabei sowohl die indirekten Bereiche der Konstruktion und Arbeitsvorbereitung als auch die Weitergabe der dort entstandenen Fertigungsinformationen an die direkten Bereiche. Die Grundlage hierfür liefert ein System, das die relevanten Fertigungsinformationen den Mitarbeitern direkter Bereiche bedarfsgerecht und interaktiv zur Verfügung stellt. Es besteht aus einem Server, der die Daten bereitstellt, und mobilen Endgeräten, die den Mitarbeitern die Informationen darstellen.

Die Anwendung auf den mobilen Endgeräten zeigt den Mitarbeitern die Arbeitsinhalte schrittweise und in einer intuitiven Darstellungsform dreidimensional und bei Bedarf per Augmented Reality (AR) an. Sie ist für eine produktive Bedienung in Fertigungsumgebungen ausgelegt und berücksichtigt – im Gegensatz zu den im Stand der Technik vorgestellten Konzepten – den hohen Flexibilitätsgrad der Unikatprozesse sowie die häufig nur grobe Planung der Arbeitsinhalte.

Werkzeuge, die sich unternehmensspezifisch als Add-ins in die Anwendung einbinden lassen, erleichtern die Bedienung und die Datenaufbereitung und sichern die Erweiterbarkeit des Konzepts. Ein Trackingbaukasten gewährleistet, dass je nach Einsatzszenario eine oder mehrere Trackingmethoden bereitstehen, die ein produktives Arbeiten mit der Anwendung in AR ermöglichen.

Die Evaluation des prototypisch umgesetzten Konzepts zeigt in zwei industriellen Anwendungsfällen die Potenziale zur Verbesserung der Informationsversorgung deutlich auf, die sich in einer hohen Anwenderzufriedenheit und einer gesteigerten Produktivität im Vergleich zur Papierzeichnung niederschlagen. Weitere Laborversuche untermauern die Potenziale statistisch und bescheinigen der Anwendung eine mögliche Produktivitätssteigerung bei der Informationsversorgung bei komplexen Aufbauten von rund 30 Prozent sowie eine deutliche Reduktion der Fehlerquote. Die Benutzer sind dabei mit der Anwendung wesentlich zufriedener als mit Papierzeichnungen.

6.2 Ausblick

Um die in dieser Arbeit aufgezeigten Potenziale einer AR-gestützten Informationsbereitstellung nutzen zu können, bedarf es eines Transfers der Ergebnisse in die industrielle Praxis, der vordergründig aus der Weiterentwicklung des Prototyps zu einem vertriebsfähigen Produkt besteht. Hierfür sind jedoch Strukturen notwendig, die die Entwicklung und den Einsatz ökonomisch plausibel machen: In der Regel gehört die Softwareentwicklung nicht zu den Kernkompetenzen produzierender Unternehmen, müsste also extern in Auftrag gegeben werden. Die Aufnahme der Anwendungsfälle und deren Anforderungen für ein Pflichtenheft verlängert die Dauer bis zu einem einsatzfähigen Produkt, das dabei im Endeffekt eine unternehmensspezifische Lösung darstellt. Zudem überschreiten die Entwicklungskosten vor allem bei kleinen und mittleren Unternehmen schnell den möglichen Nutzen. Für eine weite Verbreitung digitaler AR-gestützter Informationsbereitstellung ist es daher notwendig, dass unternehmensexterne Softwareanbieter skalierbare, i. e. an Unternehmensspezifika und viele unterschiedliche Anwendungsfälle anpassbare, Lösungen entwickeln, deren Entwicklungskosten mehrere Unternehmen als Software-Kunden tragen. Eine derartige Lösung kann als Basis für weitere Entwicklungen und Einsatzbereiche für die Software dienen:

Da sich ähnliche Aufgaben auch in anderen Bereichen der Produktion, bspw. in der Logistik und der Qualitätskontrolle, sowie im weiteren Produktlebenszyklus – z. B. in der Wartung oder dem Training – wiederfinden, ist zu prüfen, ob sich die Konzepte übertragen und erweitern lassen.

Die Evaluation zeigt, dass in Werkzeugen für automatische Datenaufbereitung ein großes Produktivitätspotenzial – vor allem für indirekte Bereiche – liegt. Dieses Feld ist daher eingehend zu untersuchen.

Weiteres, bisher nicht eingehend betrachtetes Potenzial liegt in der erweiterten Analyse der durch eine detailliertere Rückmeldung anfallenden Daten. Diese lassen sich nutzen, um die Planung zu präzisieren oder den Produktionsprozess dynamisch umzuplanen, bspw. um eine höhere Auslastung zu erzielen. Hierbei ist die Erfassung von Daten, die die Leistung einzelner Mitarbeiter wiedergeben, kritisch zu hinterfragen und die Auswirkung individueller Kennzahlen auf die Mitarbeitermotivation zu prüfen. Die vereinfachte Rückmeldung bietet ebenfalls die Möglichkeit, Erfahrungswissen der Mitarbeiter aufwandsarm zu dokumentieren: Mitarbeiter können Hinweise für nachfolgende oder wiederholte Arbeits-situations- oder ortsbezogen für ihre Kollegen festhalten. Schließt man zudem eine Qualitätskontrolle mit ein, so ließen sich aus den auftretenden Fehlern automatisiert Rückschlüsse auf die Qualität einzelner Informationen ziehen, sodass ein Regelkreis entstünde, der es erlaubte, Fehlerpotenziale in Informationen schneller zu erkennen als bisher. Gleiches gilt für die Produktivität bei der Informationsinterpretation: automatisierte

Analysen des Verhaltens der Mitarbeiter beim Beziehen der Informationen aus der Anwendung können wertvolle Rückschlüsse darüber liefern, ob die dargestellten Informationen verständlich waren.

Das Konzept ist auf den Informationsbedarf von Personengruppen (bspw. Mitarbeitern eines Fertigungsbereichs) ausgelegt und unterstellt diesen grundsätzlich ähnliche Vorkenntnisse, auf Basis derer sie die aus der Anwendung bezogenen Informationen interpretieren. Nach weiteren Untersuchungen ließe es sich zu einer gezielten Informationssteuerung ausbauen, die nicht nur den vorliegenden Anwendungsfall und den situationsspezifischen Informationsbedarf betrachtet, sondern den Adressaten der Informationen – den einzelnen Fertigungsmitarbeiter – in den Mittelpunkt rückt, indem sie dessen Kenntnisstand berücksichtigt, um die für ihn richtige Informationsmenge und Darstellungsform zu wählen. Hierbei ließen sich bspw. auch informationsarme Arbeitsschritte um weitere Informationen anreichern, um dem Mitarbeiter ein passendes Wissen zu vermitteln, das er in informationsintensiveren Arbeitsschritten als Erfahrungswissen einbringen kann.

Auch der demografische Wandel birgt für produzierende Unternehmen weitreichende Herausforderungen: Die automatische Arbeitspaketvergabe über den Datenserver stellt bereits eine Verteilung der Inhalte nach Qualifikation bereit. Diese ließe sich – nach Anreicherung der Arbeitspaketinformationen um Deskriptoren zu körperlichen Erfordernissen – erweitern, um Mitarbeiter im Rahmen ihrer körperlichen Fähigkeiten auszulasten.

Die Abschätzung der Potenziale erfolgt im vorgestellten Konzept manuell durch Experten. Bei einer Verbreitung der Lösung in die industrielle Praxis kann eine Erfahrungs- und Potenzialdatenbank diesen Prozess vereinfachen, um vergleichbare Anwendungsfälle zu finden, in denen der tatsächliche Nutzen bereits evaluiert ist, sodass eine präzisere Abschätzung im Vorwege möglich ist.

Nicht zuletzt bietet auch der technologische Fortschritt Anlässe zur Weiterentwicklung des Konzepts: Sobald Datenbrillen verfügbar sind, deren dauerhafter Einsatz sich sowohl ergonomisch als auch konzeptionell rechtfertigen lässt, ist – vor allem hinsichtlich der Bedienung – zu prüfen, wie sich diese in das dargelegte Konzept integrieren lassen. Auch eine Verbesserung der Trackingmethoden, bspw. durch in den mobilen Endgeräten integrierte 3D-Kameras, kann dazu beitragen, die Produktivität beim Einsatz AR-gestützter digitaler Arbeitsunterlagen weiter zu verbessern.

Literatur

- [Azum97] Azuma, R. T.: A survey of augmented reality. In: Presence: Teleoperators and virtual environments, vol. 6, no. 4, MIT Press, Cambridge, 1997, S. 355-385.
- [Bimb06] Bimber, O.; Raskar, R.: Modern approaches to augmented reality. In: ACM SIGGRAPH 2006 Courses (p. 1). ACM, 2006.
- [Bode15] Bodenstab, T.: Augmented Reality für die Montage von Schaltschränken, TUHH, Masterarbeit (Betreuer: Halata, P. S.; Prüfer: Lödding, H.), Hamburg, 2015.
- [Bokr06] Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen, Deutsche MTM-Vereinigung (Hrsg.), Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2006.
- [Bokr12] Bokranz, R.; Kurt, R.: Handbuch Industrial Engineering. 2. Aufl., Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2012.
- [Bort10] Bortz, J.; Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2010.
- [Braz06] Braz, C.; Robert, J.-M.: Security and Usability: The Case of the User Authentication Methods. In: IHM '06 Proceedings of the 18th Conference on l'Interaction Homme-Machine. ACM, 2006, S. 199-203.
- [Brit16] Brito, R.: Intelligent Data Transfer for Digital Assembly Instructions, TUHH, Masterarbeit (Betreuer: Halata, P. S.; Prüfer: Lödding, H.), Hamburg, 2016
- [Bull03] Bullinger, H.-J.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.: Neue Organisationsformen im Unternehmen. 2. Aufl., VDI, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2003.
- [Chak71] Chakravarti, I. M.: Confidence Set for the Ratio of Means of Two Normal Distributions when the Ratio of Variances is unknown. In: Biometrische Zeitschrift, vol. 13, no. 2, Wiley-VCH Verlag, 1971, S. 89-94.
- [Chan16] Chandra, N.; Purnomo, F.; Ricky, M. Y.; Leonard, C.; Verdian, A.: 3D Catalogue based on Augmented Reality in Android Operating System. In: MATEC Web of Conferences, vol. 54, 05002 (2016), MIMT, 2016.
- [Chan91] Chandler, P.; Sweller, J.: Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. In: Cognition and Instruction, vol. 8 no. 4, 1991, S. 293-332.

- [Chan92] Chandler, P.; Sweller, J.: The split-attention effect as a factor in the design of instruction. In: British Journal of Educational Psychology, vol. 62 no. 2, 1992, S. 233-246.
- [Chan94] Sweller, J.: Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. In: Learning and instruction, vol. 4 no. 4, 1994, S. 295-312.
- [Czum13] Czumanski, T.: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, TUHH, Dissertation, Hamburg, 2013.
- [Dall16] Dalle Mura, M.; Dini, G.; Failli, F.: An Integrated Environment Based on Augmented Reality and Sensing Device for Manual Assembly Workstations. In: Procedia CIRP, vol. 41, 2016, S. 340-345.
- [Dier08] Dierks, T.; Rescorla, R.: The transport layer security (TLS) protocol version 1.2, 2008.
- [Dikh16] Dikhof, I.: Automatische Erzeugung von Bauteilbemaßung für digitale Arbeitsunterlagen, TUHH, Bachelorarbeit (Betreuer: Halata, P. S.; Prüfer: Löd- ding, H.), Hamburg, 2016
- [DIN199] DIN 199: Technische Produktdokumentation. Beuth Verlag, 2002.
- [Diss12] Disselkamp, M.: Innovationsmanagement, Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen. 2. Aufl., Springer Gabler, Wiesbaden, 2012.
- [Dora11] Dorau, R.: Emotionales Interaktionsdesign, Gesten und Mimik interaktiver Systeme. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2011.
- [Ebbi85] Ebbinghaus, H.: Über das Gedächtnis, Untersuchungen zur experimentellen Psychologie von Herm. Ebbinghaus. Duncker und Humblot, Leipzig, 1885.
- [Enge13] Engedal, T.: Camera pose estimation apparatus and method for augmented reality imaging, US Patent US 20130335529 A1, 2013.
- [Faul11] Faulkner, X.; Hayton, C.: When Left Might Not Be Right. In: Journal of Usability Studies, vol. 6, no. 4, 2011, S. 245-256.
- [Feld14] Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G.: Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. 2. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [Figl09] Figl, K.: Usability-Fragebögen im Vergleich. In: Tagungsband Mensch & Computer. Oldenbourg, Berlin, 2009, S. 143-152.
- [Fitt54] Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. In: Journal of Experimental Psychology, vol. 47, no. 6. 1954, S. 381-391.

- [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.
- [Gens06] Genschel, U.; Becker, C.: Schließende Statistik, Grundlegende Methoden. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005.
- [Güld01] Güldenberger, S.: Wissensmanagement und Wissenscontrolling in lernenden Organisationen, Ein systemtheoretischer Ansatz. 3. Aufl., Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2001.
- [Günt06] Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, F.; Aull, F.; Rudolf, H.: Produktion individualisierter Produkte. In: Lindemann, U.; Reichwald, R. Zäh, M. F.: Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006, S. 63-113.
- [Habe12] Habermehl, R.: Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung. 12. Aufl. Orell Füssli, Zürich, 2012.
- [Hala14a] Halata, P. S.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Ein szenariobasiertes Auswahlverfahren für Augmented-Reality-Komponenten. In: Forschungsschwerpunkt Maritime Systeme der TUHH (Hrsg.): 5. Interdisziplinärer Workshop Maritime Systeme, Tagungsband, Hamburg 2014, S.25-27.
- [Hala14b] Halata, P. S.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Augmented Reality Supported Information Gathering in One-of-a-kind Production. In: Bertram, V. (Hrsg.): 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '14) Proceedings, Redworth 2014, S. 489-503.
- [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.
- [Hein15] Heinig, M.: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, TUHH, Dissertation, Hamburg, 2015.
- [Herr16] Herrmann, J.; Fitz, H.: Qualitätsmanagement – Lehrbuch für Studium und Praxis. 2. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2016.
- [Hier95] Hiersig, H. M.: Lexikon Produktionstechnik Verfahrenstechnik. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1995.
- [Hiro10] Hirotake, I.: Augmented Reality: Fundamentals and Nuclear Related Applications. In: Nuclear Safety and Simulation, vol. 1, no. 1, 2010, S. 1-12.

- [Hirs92] Hirsch, B. E.: CIM in der Unikatfertigung und -montage: Leitfaden zum Erfolg. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1992.
- [Holm79] Holm, S.: A simple sequentially rejective multiple test procedure. In: Scandinavian journal of statistics, 1997, S. 65-70.
- [Hou13] Hou, L.; Wang, X.; Bernold, L.; Love, P. E.: Using animated augmented reality to cognitively guide assembly. In: Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 27, no. 5, 2013, S. 439-451.
- [IGMe15a] IG Metall: Metallhandwerk Entgelte, 2015.
- [IGMe15b] IG Metall: Gehälter für Ingenieurinnen und Ingenieure, 2015.
- [ISO9000] DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag, 2015.
- [Izad11] Izadi, S.; Kim, D.; Hilliges, O.; Molyneaux, D.; Newcombe, R.; Kohli, P.; Shotton, J.; Hodges, S.; Freeman, D.; Davidson, A.; Fitzgibbon, A.: KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera. In: Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, 2011, S. 559-568.
- [Jesk14] Jeske, T.; Schlick, C. M., Mütze-Niewöhner, S.: Unterstützung von Lernprozessen bei Montageaufgaben. In: Schlick, C. M.; Moser, K.; Schenk, M. (Hrsg.): Flexible Produktionskapazität innovativ managen: Handlungsempfehlungen für die flexible Gestaltung von Produktionssystemen in kleinen und mittleren Unternehmen. Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg, 2014, S. 164-192.
- [Kabb93] Kabbash, P.; MacKenzie, I. S.; Buxton, W.: Human performance using computer input devices in the preferred and non-preferred hands. In: Proceedings of InterCHI'93, S. 474-481.
- [Klep09] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 6. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2009.
- [Korn13] Korn, O.; Schmidt, A.; Hörz, T.: The potentials of in-situ-projection for augmented workplaces in production: a study with impaired persons. In: CHI'13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, ACM, 2013, S.979-984.
- [Krüg06] Krüger, W.: Excellence in Change: Wege zur strategischen Erneuerung. 3. Aufl., Gabler Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [Krui10] Kruijff, E.; Swan II, J. E.; Feiner, S.: Perceptual issues in augmented reality revisited. In: ISMAR, vol. 9, 2010, S. 3-12.

- [Lenk13] Lenkeit, D.: Lohn- und Lohnnebenkosten Deutschland. Germany Trade und Invest, Berlin, 2013.
- [Lödd16a] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2008.
- [Lödd16b] Lödding, H.; Friedewald, F.; Halata, P. S.; Tietze, F.; Titov, F.: PROSPER – Produktivitätsmanagement in der schiffbaulichen Produktion ermöglichen. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Statustagung Maritime Technologien, Schloemer und Partner, Düren, 2016, S. 179-193.
- [Lott06] Lotter, B.; Wiendahl H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006.
- [Mann02] Mann, S.: Mediated reality with implementations for everyday life. In: Presence Connect, vol. 6, 2002.
- [Maye03] Mayer, R. E.; Moreno, R.: Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. In: Educational psychologist, vol. 38, no. 1, 2003, S. 43-52.
- [Melu16] Meluzov, N.: Evaluation Augmented-Reality-gestützter Fertigungsunterlagen, TUHH, Masterarbeit (Betreuer: Halata, P. S.; Prüfer: Lödding, H.), Hamburg, 2016.
- [Milg95] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Photonics for industrial applications, International Society for Optics and Photonics, 1995, S. 282-292.
- [Mill56] Miller, G. A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. In: The Psychology Review, vol. 63, 1956, S. 81-97.
- [Mosk16] Mokopp, M.; Breyer, M.; Hartmann, F.; Stork, W.; Zimmermann, R.; Schreiber, A.; Norda, F.: SchiV 3.0 – Schiffssicherheit, Vermessung und Logistik. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Statustagung Maritime Technologien, Schloemer und Partner, Düren, 2016, S. 93-108.
- [mwft16] mwf-technology GmbH: jipAR, <http://www.mwf-technology.de/de/software/jipAR.html>, zuletzt abgerufen am 31.08.2016.
- [Ohno88] Ohno, T.: Toyota production system: beyond large-scale production. Productivity Press, New York, 1988.
- [Plas10] Plass, J. L.; Moreno, R.; Brünken, R.: Cognitive Load Theory. Cambridge University Press, New York, 2010.

- [Podb12] Podbregar, N.; Lohmann, D.: Im Fokus: Neurowissen: Träumen, Denken, Fühlen - Rätsel Gehirn. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012.
- [Pola97] Polasek, W.: Schließende Statistik: Einführung in die Schätz- und Testtheorie für Wirtschaftswissenschaftler. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1997.
- [Polv14] Polvi, J.; Taketomi, T.; Yamamoto, G.; Billinghurst, M.; Sandor, C.; Kato, H.: Evaluating a SLAM-based handheld augmented reality guidance system. In: Proceedings of the 2nd ACM symposium on Spatial user interaction, ACM, 2014, S. 147.
- [Ponn11] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2011.
- [REFA16] REFA: Industrial Engineering: Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung. 2. Aufl., Carl Hanser Verlag, 2016.
- [Refl15] RE'FLEKT: Cap Automotive Common Augmented Reality Platform, Broschüre, 2015.
- [Reki98] Rekimoto, J.: Matrix: A Realtime Object Identification and Registration Method for Augmented Reality. In: Proceedings of Asia Pacific Computer Human Interaction 1998 (APCHI'98), Japan, 1998, S. 63-68.
- [Sach06] Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R. 12. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006.
- [Scar12] Scarfo, A.: New security perspectives around BYOD. In: 2012 Seventh International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), IEEE, 2012, S. 446-451.
- [Scha14] Schallmo, D. R. A.; Brecht, L.: Prozessinnovationen erfolgreich anwenden: Grundlagen und methodisches Vorgehen: Ein Management- und Lehrbuch mit Aufgaben und Fragen. Springer Gabler, Berlin/Heidelberg, 2014.
- [Sche15] Schenk, M. (Hrsg.): Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation. Springer-Vieweg, Berlin/Heidelberg, 2015.
- [Schi07] Schilling, T.: Augmented Reality in der Produktion. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, Ilmenau, 2008.
- [Scho80] Schomburg, E.: Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau. Technische Hochschule Aachen, Dissertation, Aachen, 1980.

- [Schr12] Schreiber, W.; Zimmermann, P. (Hrsg.): Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld: Das AVILUS-Projekt – Technologien und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012.
- [Send09] Sendler, U.: Das PLM-Kompodium. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2009.
- [Stud08] Student: The probable error of a mean. In: Biometrika, S. 1-25, 1908.
- [Stue11] Stuerzlinger, W.; Wingrave, C. A.: The Value of Constraints for 3D User Interfaces. In: Virtual Realities: Dagstuhl Seminar 2008, Brunett, G.; Coquillart, S.; Welch, G. (Hrsg.), Springer-Verlag, Wien, 2011.
- [Swel90] Sweller, J.: Cognitive Processes and Instruction Procedures. In: Australian Journal of Education, vol. 34, no. 2, S. 125-30.
- [Tang03] Tang, A.; Oven, C.; Biocca, F.; Mou, W.: Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly. In: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, ACM, 2003, S. 73-80.
- [Tiet13] Tietze, F.; Lödding, H.: Analyse der Arbeitsproduktivität in Arbeitsvorbereitung und Produktion von Unikaten. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Corporate Capability Management - Wie wird die kollektive Intelligenz im Unternehmen genutzt? Hochschulgruppe Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Berlin, 2013, S. 185-210.
- [Tiet17] Tietze, F.: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, TUHH, Dissertation, Hamburg, 2017.
- [Tito16] Titov, F.: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, TUHH, Dissertation, Hamburg 2016.
- [Tönn13] Tönnis, M.; Plecher, D. A.; Klinker, G.: Representing information - Classifying the Augmented Reality presentation space. In: Computers & Graphics, vol. 37, no. 8, 2013, S. 997-1011.
- [Tu11] Tu, Y.; Dean, P.: One-of-a-Kind Production. Springer-Verlag, London, 2011.
- [vanK10] van Krevelen, D. W. F.; Poelman, R.: A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. In: International Journal of Virtual Reality, vol. 9, no. 2, 2010, S. 1-19.
- [VDI2492] Verein Deutscher Ingenieure: Multimomenthäufigkeitsverfahren (MMH-Verfahren) in der betrieblichen Praxis. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL), 2013.

- [vomS14] vom Stein, A. M.; Knott, V.: Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben Einsatz der Augmented-Reality-Technologie zur Unterstützung des Fahrers von Flurförderzeugen, Technische Universität München, 2014.
- [Wagn08] Wagner, D.; Reitmayr, G.; Mulloni, A.; Drummond, T.; Schmalstieg, D.: Pose tracking from natural features on mobile phones. In: ISMAR '08 Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, IEEE Computer Society, Washington, DC, 2008, S. 125-134.
- [Wang13] Wang, X.; Kim, M. J.; Love, P. E.; Kang, S. C.: Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research. In: Automation in Construction, vol. 32, 2013, S. 1-13.
- [Webe13] Webel, S.; Bockholt, U.; Engelke, T.; Gavish, N.; Olbrich, M.; Preusche, C.: An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. In: Robotics and Autonomous Systems, vol. 61, no 4, 2013, S. 398-403.
- [Webe98] Weber, H. K.: Rentabilität, Produktivität und Liquidität: Größen zur Beurteilung und Steuerung von Unternehmen. 2. Aufl., Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [Welc02] Welch, G.; Foxlin, E.: Motion tracking: no silverbullet, but a respectable arsenal. In: IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 22, no. 6, 2002, S. 24-38.
- [West13] Westkämper, E.: Integration in der digitalen Produktion. In: Westkämper, E.; Spath, D.; Constaninescu, C.; Lentjes, J. (Hrsg.): Digitale Produktion. Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg, 2013, S. 133-143.
- [Wien97] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1997.
- [Winz15] Winz, G.: Qualitätsmanagement für Wirtschaftsingenieure: Qualitätsmethoden, Projektplanung, Kommunikation. Carl Hanser Verlag, München, 2015.
- [With09] Wither, J.; DiVerdi, S.; Höllerer, T.: Annotation in outdoor augmented reality. In: Computers & Graphics, vol. 33, no. 6, 2009, S. 679-689.
- [Wöhe08] Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 23. Aufl., Vahlen, München, 2008.
- [Zhu12] Zhu, J.; Ong, S. K.; Nee, A. Y. C.: An authorable context-aware augmented reality system to assist the maintenance technicians. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 66 no. 9-12, 2013, S. 1699-1714.

Lebenslauf

Name: Halata
Vorname: Philipp Sebastian
Staatsangehörigkeit: deutsch
Geburtsdatum: 03.06.1986
Geburtsort, -land: Hamburg, Deutschland

08.1992 - 07.1996 Grundschule Ifflandstraße in Hamburg
08.1996 - 07.2005 Gymnasium Gelehrtenschule des Johanneums in Hamburg
10.2005 - 11.2012 Studium an der TU Hamburg-Harburg
Abschluss: Diplom-Ingenieur
01.2013 - 06.2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der TU Hamburg-Harburg
07.2016 - 08.2016 Vorbereitung der Selbstständigkeit
09.2016 - heute geschäftsführender Gesellschafter der attenio GmbH, Hamburg

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

Davids, 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 Standzeitoptimierung 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.