

Technologiestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter

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

von
Fedor Titov

aus
Zhukowskij

2016

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

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Friedrich Wirz

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juli 2016

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

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestr. 17

21073 Hamburg

Band 31:

Fedor Titov

Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter

1. Auflage

Hamburg 2016

ISSN 1613-8244

Copyright Fedor Titov 2016

Herstellung:

Elbepartner Breitschuh & Kock GmbH

Friesenweg 5b

22763 Hamburg

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts und meinem Hauptgutachter Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding für die Betreuung meiner Arbeit, für die Freiräume eigene Ideen einbringen und umsetzen zu können und die mir dabei stets entgegengebrachte Unterstützung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich Wirz möchte ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens danken. Weiterhin danke ich dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie der Technischen Universität Hamburg für die sehr guten Rahmenbedingungen und die finanzielle Unterstützung.

Ich danke allen Kollegen am Institut für fünf wundervolle Jahre sowohl auf der inhaltlichen als auch der sozialen Seite. Besonders erwähnen möchte ich meine Bürokollegen Sebastian Schleusener und Dr. Martin Heinig, die mich die ersten zwei Jahre durch alle Höhen und Tiefen begleitet haben. Zudem möchte ich Herrn Florian Tietze und Herrn Philipp Halata für drei sehr aufregende Jahre bei unserem gemeinsamen Forschungsprojekt PROSPER danken, aus dem letztlich die Inhalte für meine Dissertation entstanden sind. Gemeinsam haben wir den Grundstein für unsere eigene Zukunft gelegt und gründen auf den erarbeiteten Inhalten ein Unternehmen. Auf diese Herausforderung freue ich mich bereits heute. Weiterhin danke ich Herrn Martin Benter für die nette Ablenkung, wenn mir die Promotion zu viel wurde und für die Durchsicht meiner Dissertation.

Ganz besonders möchte ich Herrn Dr. Axel Friedewald, dem Oberingenieur des Instituts, danken für seine inhaltlichen Anmerkungen, die fachlichen Gespräche, sein überdurchschnittliches Engagement und die unermüdliche Unterstützung meiner Promotion.

Ich danke allen Studenten, die mich bei der Promotion begleitet haben. Hervorheben möchte ich Frau Lea-Nadine Schwede und Herrn Alexander Hillmer, die mir bei der Umsetzung der Prototypen und der Gestaltung der Arbeit geholfen haben.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Frau Jana Titov für ihre Unterstützung und ihren Rückhalt während der gesamten Zeit sowie ihre Hilfe in schwierigeren Phasen der Promotion. Ebenfalls danke ich meinen Eltern Mikhail und Marina Titov(a) für alles, was sie für mich getan haben, diese Arbeit ist für euch!

Hamburg, im Juli 2016

Fedor Titov

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Situationsanalyse und Grundlagen.....	5
2.1 Komplexe Investitionsgüter	5
2.1.1 Definition.....	5
2.1.2 Merkmale komplexer Investitionsgüter.....	6
2.2 Umbauprozesse	7
2.2.1 Definition von Umbauprozessen	7
2.2.2 Klassifizierung unterschiedlicher Umbauprozesse.....	9
2.2.3 Auswirkungen auf die komplexen Investitionsgüter	11
2.2.4 Defizite in der Literatur beschriebener Umbauprozesse	12
2.3 Angebotserstellung	13
2.3.1 Beschreibung und Abgrenzung	14
2.3.2 Defizite der Angebotserstellung	16
2.4 Ansätze zur Verbesserung der Produktivität und der Qualität	20
2.4.1 Technologien zur Geometrieerfassung.....	20
2.4.2 Virtuelle Realität	26
2.4.3 Erweiterte Realität	27
2.4.4 Defizite vorhandener Ansätze	29
2.5 Fazit der Grundlagen	30
3 Phasenmodell der Angebotserstellung.....	33
3.1 Ziele und Anforderungen der Angebotserstellung	33
3.1.1 Ziele	33
3.1.2 Anforderungen an den Angebotserstellungsprozess	34
3.2 Grundmodell.....	34
3.2.1 Angebotserstellungsprozess	35
3.2.2 Einordnung in bestehende Ablaufmodelle zur Angebots- erstellung	39
3.2.3 Einordnung in den Gesamtumbauprozess	41

3.3	Abhängigkeiten.....	42
3.3.1	Logische Abhängigkeiten	42
3.3.2	Prozessbedingte Abhängigkeiten	43
3.3.3	Lösungsspezifische Abhängigkeiten.....	44
3.3.4	Zeitliche Abhängigkeiten.....	45
3.4	Anforderungen an die Methoden und Werkzeuge.....	46
3.4.1	Datenaufbereitung.....	47
3.4.2	Lösungsfindung.....	49
3.4.3	Ergebnisbereitstellung.....	51
4	Datenaufbereitung	53
4.1	Initialisierung	53
4.1.1	Informationsgrundlage	53
4.1.2	Aufnahme projektbezogener Daten	55
4.1.3	Visualisierung von Standardkomponenten	57
4.1.4	Konfiguration des Prozesses	59
4.2	Aufnahme der Ist-Geometrie	64
4.2.1	Geometrische Grundlage	64
4.2.2	Festlegen des Untersuchungsbereichs.....	67
4.2.3	Kalkulation des Aufnahmeaufwands	68
4.2.4	Verfahren zur Aufnahme der Ist-Geometrie	75
4.3	Reverse Engineering	82
4.3.1	Erzeugung des Planungsmodells.....	82
4.3.2	Methode zur anforderungsgerechten Rekonstruktion.....	85
5	Lösungsfindung	87
5.1	Variantenplanung und -bewertung	87
5.1.1	Engineering	87
5.1.2	Planung der Varianten.....	90
5.1.3	Identifikation ergonomisch kritischer Tätigkeiten.....	94
5.1.4	Absicherung ergonomisch kritischer Tätigkeiten	97
5.2	Organisation & Kalkulation.....	100
6	Ergebnisbereitstellung.....	103
6.1	Unterlagenbereitstellung.....	103
6.1.1	Angebotskonfiguration	103

6.1.2	Kalkulation sämtlicher Leistungen.....	105
6.1.3	Visualisierung des Angebots	106
6.2	Prozessaufbereitung	109
6.2.1	Dokumentation	109
6.2.2	Prozessverfolgung	110
7	Evaluation	115
7.1	Überblick und Ziele.....	115
7.2	Software-Prototypen.....	116
7.2.1	Prozesskonfigurator	116
7.2.2	Frühabschätzungstool	118
7.2.3	Mobile Aufnahmeplattform.....	121
7.2.4	Virtuelle Lösungsdarstellung und -planung	123
7.2.5	ViP-Toolset Ergonomie.....	125
7.2.6	Fazit	126
7.3	Anwendungsbeispiel: Umbau einer Fähre	126
7.3.1	Ausgangssituation.....	127
7.3.2	Angebotserstellung	128
7.3.3	Bewertung.....	134
8	Schlussbetrachtung	137
8.1	Zusammenfassung	137
8.2	Ausblick	138
	Literaturverzeichnis.....	141
	Anhang	153

Abkürzungsverzeichnis

AOI	Area Of Interest
AC	Actual Cost
AR	Augmented Reality
BK	Bewertungskriterium
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECA	Emission Control Area
EV	Earned Value
GPS	Global Positioning System
IMO	International Maritime Organisation
KSV	Kinect Scan Viewer
LCC	Life Cycle Costing
LNG	Liquified Natural Gas
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul
MS	Microsoft
MSE	Mobile Scaneinheit
OST	Optical See Through
PV	Planned Value
RGB	Rot Grün Blau
SAR	Spatially Augmented Reality
SCR	Selective Catalytic Reduction
TCO	Total Cost of Ownership
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ViP	Virtual Production Toolset
VR	Virtual Reality
VST	Video See Through

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Umweltbilanz zu verbessern, die Lebensdauer zu verlängern oder die Wirtschaftlichkeit von Produkten zu steigern bewegt Besitzer dazu, ihre Produkte umzubauen und durch neue Komponenten zu verbessern. Besonders große, komplexe Produkte mit hohen Investitionskosten und hoher Lebensdauer wie Schiffe, Gebäude oder Industrieanlagen sind von solchen Maßnahmen betroffen. Sie wirken sich auf das gesamte Produkt aus und beeinflussen es an mehreren Stellen. Die neuen Komponenten und Erweiterungen sind im ursprünglichen Design des Produkts nicht enthalten und verändern neben den gewünschten neuen Eigenschaften häufig auch das Aussehen oder sogar die Funktionsweise des Produkts.

Für solche Umbauten beauftragt der Kunde normalerweise einen Generalauftragnehmer. Dieser erstellt dann ein Angebot über die Maßnahmen. Die VDI-Norm 4504 stellt einen Prozess für die Angebotserstellung für neue Investitionsgüter bereit [VDI4504]. Anders als bei neuen Produkten muss der Generalauftragnehmer bei Umbauten allerdings mit der vorhandenen Struktur und Umgebung planen und die Maßnahmen innerhalb dieser Grenzen umsetzen. Zudem sind diese Rahmenbedingungen in der Regel sehr unterschiedlich. Jede Umbaumaßnahme komplexer Investitionsgüter erfordert eine individuelle Lösung. Der in der VDI-Norm beschriebene Prozess für die Angebotserstellung ist daher für Umbauprozesse nicht direkt verwendbar.

Der Kunde erwartet ein zuverlässiges Angebot und stellt den Generalauftragnehmer damit vor große Herausforderungen. Um eine hohe Qualität der Planung zu gewährleisten, müsste der Generalauftragnehmer bereits in der Angebotserstellung eine sehr detaillierte Planung durchführen. Auf der anderen Seite rechtfertigt eine Auftragswahrscheinlichkeit von nur 10 bis 30% den hohen Aufwand dafür in der Regel nicht [Diet13][Klei98]. Der Generalauftragnehmer verzichtet deshalb häufig auf einschlägige Untersuchungen und schätzt die späteren Aufwände. Dieses Vorgehen führt bei einer Auftragsannahme häufig zu unerwünschten Nachkalkulationen oder sogar zur Nacharbeit beim Umbau.

Um den Aufwand für die Angebotserstellung zu reduzieren und die Qualität der Angebote zu erhöhen, benötigt der Generalauftragnehmer Methoden und Werkzeuge, die ihn bei der Erstellung der Angebote unterstützen. Unterschiedliche technologische Ansätze wie Augmented Reality (AR) für die Verbesserung der Kommunikation oder Interaktion [Mehl14] oder Laserscanning für die Aufnahme der vorhandenen Geometrie [Dona08] haben das Potenzial, um die Produktivität des Prozesses zu verbessern und letztlich die Auftragswahrscheinlichkeit zu erhöhen.

Sie sind für den Umbau komplexer Investitionsgüter in der bestehenden Form jedoch nicht geeignet und müssen angepasst und erweitert werden.

1.2 Zielsetzung

Die Arbeit verfolgt das Ziel, eine produktive Angebotserstellung mit einer hohen Qualität des Angebots für den Umbau komplexer Investitionsgüter zu ermöglichen. Um dieses Ziel zu erreichen, entwickelt die Arbeit einen Angebotserstellungsprozess. Für diese Entwicklung verfolgt die Arbeit vier Teilziele:

1) *Effizienz und Qualität*: Ziel ist es, dem Generalauftragnehmer einen Prozess für die Erstellung von Angeboten für Umbaumaßnahmen bereitzustellen, der eine aufwandsarme Bearbeitung bei gleichzeitig hoher Qualität des Ergebnisses ermöglicht. So soll der Generalauftragnehmer den Aufwand signifikant reduzieren und gleichzeitig die Auftragswahrscheinlichkeit steigern.

2) *Übertragbarkeit*: Das für komplexe Investitionsgüter erstellte Konzept soll auf verschiedene Branchen ohne große Anpassungen übertragbar sein. Weiterhin soll es unterschiedliche Umbaumaßnahmen abdecken und damit einen universellen Einsatz sicherstellen.

3) *Standardisierung*: Das Ziel ist, ein einheitliches Vorgehen für die Angebotserstellung bereitzustellen. Dafür soll das Konzept die vorhandene VDI-Richtlinie für Umbaumaßnahmen erweitern und damit ein methodisches Vorgehen sicherstellen.

4) *Individualisierung*: Ziel ist es, jedem Generalauftragnehmer einen an die vorliegenden Rahmenbedingungen angepassten Angebotserstellungsprozess bereitzustellen. Das bedeutet, der Prozess sieht abhängig von den Einflussgrößen unterschiedlich aus und beinhaltet andere Arbeitsinhalte.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Nach der Einleitung stellt Kapitel 2 die wissenschaftlichen Grundlagen vor und definiert dafür zunächst die Begriffe komplexes Investitionsgut und Umbauprozess. Anschließend grenzt es das Problem ein und arbeitet die Defizite vorhandener Angebotserstellungsprozesse aus. Abschließend analysiert das Kapitel die Problemstellung und die vorhandenen Ansätze, um diese zu lösen.

Kapitel 3 leitet aus den Defiziten die Ziele und Anforderungen für den Angebotserstellungsprozess ab. Darauf aufbauend entwickelt es ein Konzept um den bestehenden VDI-Prozess zur Angebotserstellung zu erweitern. In Anlehnung an den Problemlösungszyklus von Haberfellner et. al. [Habe02] teilt die Arbeit das Vorgehen

dazu in die drei Phasen Datenaufbereitung, Lösungsfindung und Ergebnisbereitstellung (Abbildung 1-1). Das Kapitel leitet die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Phasen und den Bedarf für unterstützende Methoden her.

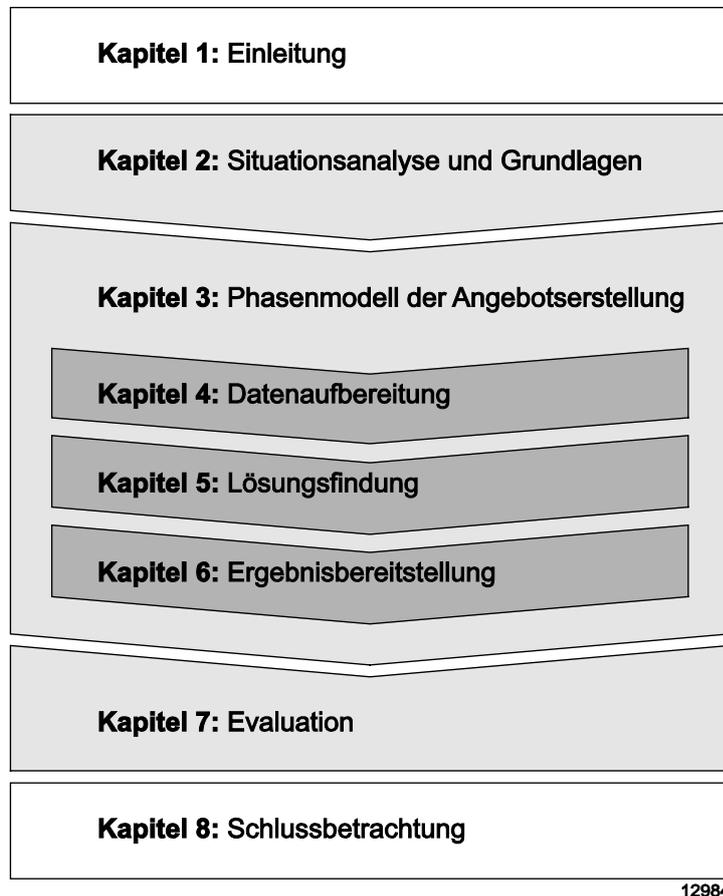


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

Die nachfolgende Datenaufbereitung (Kapitel 4), Lösungsfindung (Kapitel 5) und Ergebnisbereitstellung (Kapitel 6) definieren die Prozessphasen. In jedem Kapitel wird zunächst das konzeptionelle Vorgehen abgeleitet und werden die Eingangs- und Ausgangsgrößen definiert. Die Abschnitte der Kapitel stellen dar, wie unterstützende Methoden hergeleitet und erforderliche Werkzeuge entwickelt werden.

Kapitel 7 evaluiert die einzelnen Werkzeuge, bevor es anschließend den Gesamtprozess unter Einsatz aller Methoden und Werkzeuge an einem Praxisbeispiel validiert. Kapitel 8 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungsfelder.

2 Situationsanalyse und Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die aktuelle Situation, stellt die vorhandenen Probleme dar und leitet die Defizite ab. Dazu grenzt Abschnitt 2.1 zunächst den Begriff komplexer Investitionsgüter ab. Abschnitt 2.2 beschreibt die Umbauprozesse und verknüpft diese mit den komplexen Investitionsgütern. Anschließend behandelt Abschnitt 2.3 die Angebotserstellung als zentrales Element von Umbauprozessen mit besonders hohem Verbesserungspotenzial. Die VDI-Richtlinie zur Erstellung von Angeboten [VDI4504a] dient als Grundlage für das weitere Vorgehen. Abschnitt 2.4 beschreibt vorhandene Ansätze, um den Aufwand für die Angebotserstellung zu reduzieren und ihre Qualität zu erhöhen und leitet ihre Defizite ab. Abschließend fasst Abschnitt 2.5 das Forschungsdefizit für die Angebotserstellung und die vorhandenen Verbesserungsansätze zusammen.

2.1 Komplexe Investitionsgüter

Dieser Abschnitt zeigt auf, wie sich komplexe Investitionsgüter von anderen Produkten und Dienstleistungen unterscheiden. Dazu wird zunächst der Begriff des komplexen Investitionsguts definiert (Abschnitt 2.1.1), anschließend werden charakteristische Merkmale erläutert (Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Definition

Investitionsgüter sind Produkte oder Leistungen mit hohen Anschaffungs- und Betriebskosten sowie langer Lebensdauer [Hofm12]. Sie haben in der Regel einen hohen Stellenwert für das Unternehmen, da sie beschafft werden, um mit ihrem Einsatz weitere Güter für die Fremdbedarfsdeckung zu erstellen [Enge81]. Die gesamten Produktlebenskosten und die Amortisationszeit hängen von vielen Faktoren ab, wie bspw. Nutzungsgrad, Wartungsintervallen und unterschiedlichen Regularien. Investitionsgüter werden – anders als Roh- und Betriebsstoffe nur selten beschafft [Swan02]. In der Literatur existiert keine einheitliche Definition für Investitionsgüter. Die wohl allgemeinste stellen Suckrow und Backhaus auf:

Suckrow unterscheidet den Begriff Investitionsgut nach einer engeren und einer weiteren Auffassung. In der engeren Auffassung setzt er Investitionsgüter mit Anlagegütern gleich [Suck96]. Damit sind Sachgüter des Umlaufvermögens nicht in dieser Definition enthalten. In der weiteren Auffassung benutzt er die Definition nach Backhaus und beschreibt Investitionsgüter als Leistungen, die von Organisationen beschafft werden, um weitere Leistungen zu erstellen, die nicht in der Distribution an Endkonsumenten bestehen [Back92]. Diese Definition ist sehr allgemein und umfasst unterschiedliche Geschäftstypen [Back03]:

- Anlagengeschäft
- Zuliefergeschäft
- Systemgeschäft
- Produktgeschäft

Die vorliegende Arbeit betrachtet primär das Anlagengeschäft. Hofmann gibt zu diesem Geschäftstyp eine Definition, welche die Arbeit verwendet:

Investitionsgüter sind materielle und immaterielle Güter, die von Organisationen beschafft werden und die technische Voraussetzungen der betrieblichen Leistungserstellung bilden. Kennzeichnend für Investitionsgüter sind die Dauerhaftigkeit der Nutzung unter dem möglichen Einbezug von Bereitstellungs-, Wartungs- und Instandsetzungsdienstleistungen sowie der im Vergleich zum Material hohe Wert eines einzelnen Objekts [Hofm12].

2.1.2 Merkmale komplexer Investitionsgüter

Das hier betrachtete Investitionsgütergeschäft ist in der Regel durch hohe Kosten, individuelle Lösungen und Einzeltransaktionen charakterisiert. Diese Eigenschaften führen zu Business-to-business-Beziehungen, also direkten Beziehungen zwischen Kunde (Unternehmen) und Hersteller (Unternehmen) [Back92]. Da der lokale Markt häufig nicht ausreicht, sind die Hersteller international ausgerichtet.

Komplexe Investitionsgüter sind in der Regel sehr langlebige Produkte. Der Unikatcharakter und die Individualität der Lösungen führen zu hohen Anschaffungskosten [Hofm12]. Neben der hohen Anfangsinvestition sind Service und Aftersales-Verträge von großer Bedeutung. Zusätzlich sind die in der Regel hohen Betriebskosten für Personal, Räumlichkeiten, Schulungen etc. für den Betreiber relevant. Bei einer Kaufentscheidung ist daher eine Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCO) oder der Life Cycle Costing (LCC) von Interesse [Derv06][VDI 2884]. Die nach Vertragsabschluss entstehenden Kosten bilden häufig den größten Kostenfaktor. Ein wesentlicher Bestandteil und häufig während der Anschaffung schwierig kalkulierbarer Anteil sind die Umbau- und Modernisierungskosten.

Die Produkte sind normalerweise sehr groß im Volumen und sind als Unikate oder Kleinserien gebaut. Weiterhin bestehen sie in der Regel aus vielen unterschiedlichen Systemen und Einzelkomponenten. Dies erfordert die Beteiligung mehrerer spezialisierter Unternehmen sowohl am Produktionsprozess als auch während des Lebenszyklus.

Diese Arbeit betrachtet komplexe Investitionsgüter mit folgenden Merkmalen:

- Sehr große, materielle Produkte
- Hohes Investitionsvolumen
- Unikate
- Lange Entwicklungs- und Lebensdauer
- Hohe Komplexität durch die notwendige Integration verschiedener Gewerke/Zulieferer
- Hoher Anteil an Fremdleistung

Klassische Branchen für die betrachteten komplexen Investitionsgüter sind der Anlagenbau, der Schiffbau und das Bauwesen. Die Luftfahrtindustrie und der Schienenfahrzeugbau erfüllen zwar die meisten Merkmale, sind allerdings nicht primärer Forschungsgegenstand dieser Arbeit.

2.2 Umbauprozesse

Der Abschnitt definiert zunächst Umbauprozesse und grenzt diese von Instandhaltungsmaßnahmen ab (2.2.1). Anschließend klassifiziert Abschnitt 2.2.2 die Umbauprozesse und grenzt die relevanten Prozesse ein, bevor Abschnitt 2.2.3 die Auswirkungen der Maßnahmen auf die komplexen Investitionsgüter diskutiert. Abschließend fasst Abschnitt 2.2.4 die bestehenden Defizite bei Umbaumaßnahmen von komplexen Investitionsgütern zusammen.

2.2.1 Definition von Umbauprozessen

Umbaumaßnahmen sind Umgestaltungen eines vorhandenen Objekts mit wesentlichen Eingriffen in Konstruktion und Bestand [HOAI2]. Solche Maßnahmen machen typischerweise einen beträchtlichen Anteil der Lebenszykluskosten aus und können unterschiedliche Teilmaßnahmen wie Renovieren, Erneuern, Verbessern, Modernisieren oder Ausbauen enthalten [VDMA06].

Bei einem kleineren Umfang der Maßnahmen zählt die Literatur Umbaumaßnahmen zur Instandhaltung. Nach der DIN-Norm 31051 gliedert sich die Instandhaltung in die Bereiche Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserungsmaßnahmen. Die ersten drei Bereiche dienen der Funktionserhaltung der Anlagen. Bei der Verbesserung ist das primäre Ziel die Funktionssicherheit und die Steigerung der Produktivität [Meie12]. Die DIN beschreibt Verbesserungen als eine Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern [DIN31051].

Auf der DIN aufbauend beschreiben Bartsch et. al. die Einhaltung der Sicherheit und des Umweltschutzes als weitere Ziele der Umbau- und Instandhaltungsprozesse von Gebäuden [Bart08].

Die vorliegende Arbeit betrachtet größere Umbaumaßnahmen, die über die oben genannte Definition nach DIN hinausgehen und damit kein Teil von Instandhaltungsmaßnahmen sind. Insbesondere ist die Verlängerung der geplanten Lebensdauer ein weiteres definiertes Ziel. Die Arbeit betrachtet größere Umbauprozesse mit den Zielen:

- die Produktivität zu steigern, also die Betriebskosten zu senken oder den Output zu erhöhen,
- die Sicherheit einzuhalten,
- die Umweltwerte zu verbessern und
- die Lebensdauer zu verlängern.

Die Arbeit nutzt zudem den englischen Begriff Retrofitting. Dieser ist definiert als Umbau oder Erweiterung alter Systeme durch neue Technologien oder Eigenschaften [Busc11]. Diese Maßnahmen haben weitreichende Auswirkungen auf die umliegenden Systeme, bzw. auf den Betrieb. So verändern sie bspw. Fluchtwege oder Evakuierungspläne.

Viele Unternehmen haben die Bedeutung von Retrofit-Maßnahmen erkannt und planen diese im Produktlebenszyklus ein. Im Anlagenbau rüstet bspw. die Firma ABB Anlagen um. Diese Maßnahmen sollen die Lebensdauer, die Sicherheit oder die Verfügbarkeit der Anlagen erhöhen [ABB13]. Abbildung 2-1 stellt die wirtschaftliche Betrachtung solcher Projekte in einem Netzdiagramm dar.

Im Bauwesen war der Kostenpunkt Umbau/Renovation bei der Erstellung von schlüsselfertigen Gebäuden bislang nicht eingeplant. In letzter Zeit findet allerdings ein Umdenken statt [Girm06].

Umbauprozesse sind Schritte, die erforderlich sind, um eine bestimmte Maßnahme am Produkt vorzunehmen. Klassischerweise werden diese nicht vom Produktbesitzer, sondern von Drittanbietern oder dem Hersteller durchgeführt.

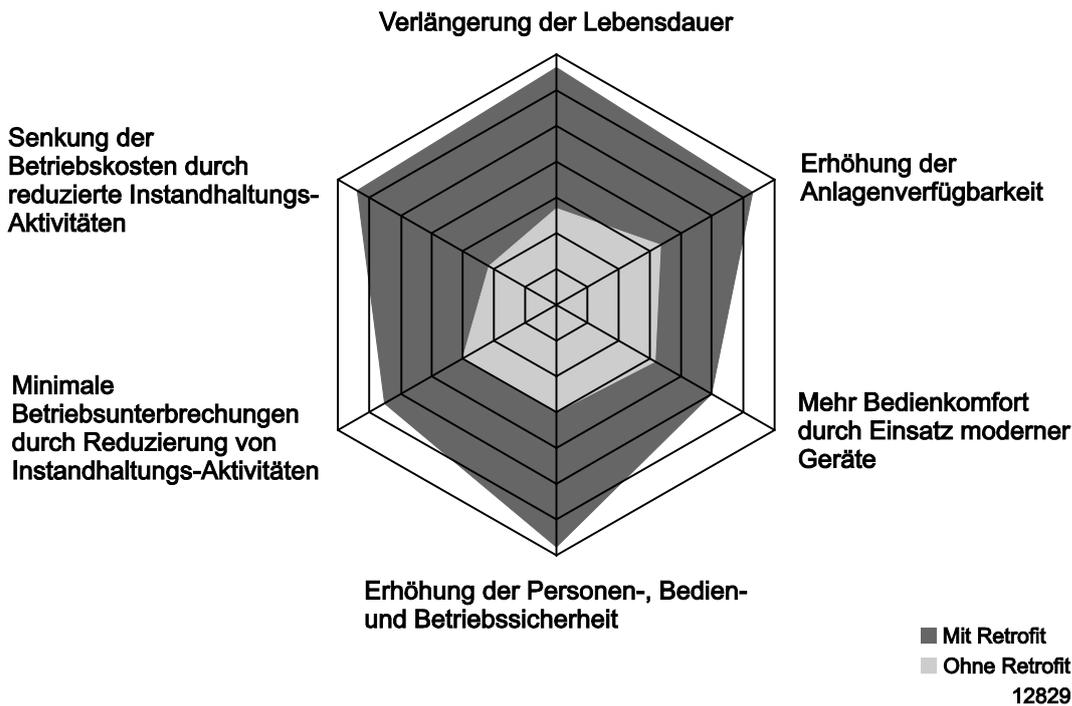


Abbildung 2-1: Wirtschaftliche Betrachtung von Retrofit-Maßnahmen [nach ABB13]

2.2.2 Klassifizierung unterschiedlicher Umbauprozesse

Umbauprozesse können unterschiedlich komplex und kostenintensiv sein. Sie beeinflussen die Funktionsweise des Produkts und der umliegenden Systeme in unterschiedlichem Umfang. Das mögliche Spektrum lässt sich über den Standardisierungsgrad und den Aufwand der Maßnahmen beschreiben. Der Standardisierungsgrad gibt an, ob eine Lösung häufig vorgenommen wird oder ob es eine individuelle Lösung ist. Eine Maßnahme mit einem hohen Standardisierungsgrad ist bspw. die Nachrüstung eines Rußpartikelfilters bei älteren Dieselmotoren [Jaco08]. Die Kombination aus der Umbaumaßnahme und dem umzubauenden Produkt bestimmt den Aufwand der Maßnahmen. Dieser kann relativ zu den Komponentenkosten gering oder hoch sein. Die seismische Absicherung von Gebäuden bspw. ist mit einem hohen Aufwand verbunden [Toll02]. Als Beispiel für einen geringen Aufwand einer individuellen Lösung stellt Roos den Umbau eines Werftportalkrans vor [Roos09].

Abbildung 2-2 klassifiziert beispielhaft unterschiedliche Umbaumaßnahmen nach dem Standardisierungsgrad und dem Aufwand der Maßnahmen. Dienstleister, die Standardumbauten mit geringer Komplexität durchführen, durchlaufen in der Regel einen festgelegten Prozess. Die Preise sind für die unterschiedlichen Arbeitsschritte festgelegt. Solche Umbauten sind ausreichend bekannt und nicht Teil dieser Arbeit. Diese Arbeit beschäftigt sich mit Maßnahmen im schraffierten Bereich. Sie erfordern einen hohen Aufwand und stellen individuelle Lösungen dar.

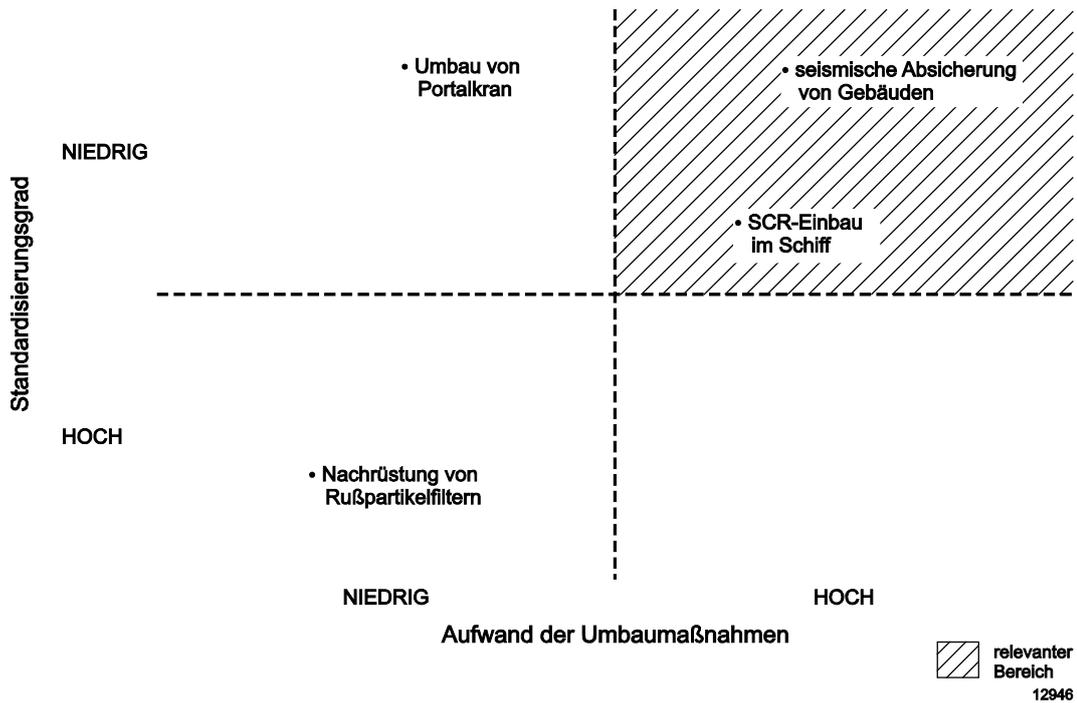


Abbildung 2-2: Individualitätsgrad und Komplexität von beispielhaften Umbaumaßnahmen

Wie in Abschnitt 2.2.1 erläutert, führen meist externe Dienstleister solche Umbauten aus. Dabei koordiniert der Dienstleister oft alle Aufgaben, d.h. die Planung des Umbaus, die Herstellung der Komponenten und den Umbau selbst. Die einzelnen Tätigkeiten der Umbaumaßnahmen kann der Dienstleister normalerweise nicht selbst ausführen und vergibt sie an externe Partner. Dabei tritt der Dienstleister dem Kunden gegenüber als Generalauftragnehmer auf und übernimmt die Verantwortung für die unterschiedlichen Arbeiten. Abbildung 2-3 stellt den grundsätzlichen Umbauprozess solcher Maßnahmen dar.

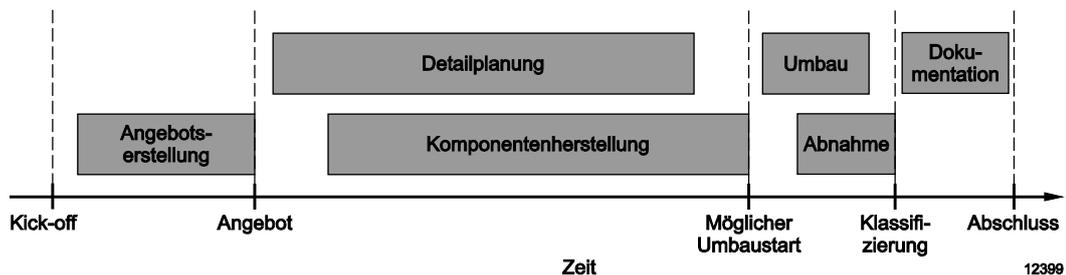


Abbildung 2-3: Umbauprozess [Frie13]

Der vorliegende Prozess besteht aus sechs Phasen und drei Meilensteinen [Frie13]: Die Angebotserstellung entwickelt zunächst ein Angebot für die angefragte Maß-

nahme und endet mit dem ersten Meilenstein. Nach erfolgter Auftragsvergabe arbeitet die Detailplanung die konkreten Maßnahmen aus. Die Herstellung der Komponenten findet z.T. parallel zu der Detailplanung statt. Sobald beide Schritte abgeschlossen sind, liegt der frühestmögliche Umbaustart und damit ein weiterer Meilenstein vor. Anschließend erfolgen der eigentliche Umbau und die Abnahme durch den Kunden oder höhere Instanzen (bspw. bestimmte Ämter oder Klassifizierungsgesellschaften). Danach ist der dritte Meilenstein – die Fertigstellung erreicht. Abschließend dokumentiert der Generalauftragnehmer den Prozess.

Die Meilensteine legt der Generalauftragnehmer mit dem Kunden gemeinsam fest. Häufig sind diese allerdings bereits durch Wünsche des Kunden (bspw. festgelegtes Datum für das Angebot durch Ausschreibungen) oder branchenspezifische Anforderungen (bspw. können Schiffe nur auf einer Werft umgebaut werden) gegeben. Der Prozess passt sich diesen Gegebenheiten an. Unterschiedliche Unternehmen nutzen angepasste Prozesse, die im Vorgehen jedoch weitestgehend dem beschriebenen Prozess entsprechen. Im Industriebau folgt das Unternehmen Tesium einer ähnlichen Vorgehensweise für den Umbau von Brownfield-Anlagen [Tesi08]. Im Schiffbau verfolgen Unternehmen wie Wärtsilä [Waer13] oder Goltens [Bare12] vergleichbare Ansätze.

Normalerweise löst der Kunde den Umbauprozess beim Generalauftragnehmer aus, in manchen Branchen sind allerdings Ausschreibungen die Regel. Besonders Umbauprojekte mit öffentlichem Interesse, wie der Marineschiffbau oder denkmalgeschützte Gebäude im Bauwesen, werden häufig ausgeschrieben. Ab einer bestimmten Auftragshöhe sind öffentliche Einrichtungen sogar gezwungen auszuschreiben [Bung07]. In diesem Fall entwickeln unterschiedliche Generalauftragnehmer Angebote und reichen sie dann parallel mit weiteren Konkurrenten bei dem Kunden ein.

2.2.3 Auswirkungen auf die komplexen Investitionsgüter

Im Allgemeinen hat der Umbau von komplexen Investitionsgütern messbare Auswirkungen auf das gesamte Produkt:

- Strukturelle Veränderungen (Anbauten, Schwerpunktverlagerung)
- Optische Veränderungen (Anbauten)
- Ablaufänderungen für die Benutzer (neue Wartungsabläufe, andere Rettungswege)
- Kapazitätsverluste (Verlust von Betriebsfläche)

Unabhängig von der Branche und der geplanten Maßnahme existieren für den Kunden zwei Probleme beim Retrofit:

- Das Produkt wurde in der Regel nicht für die einzubauende Technologie entwickelt und konstruiert.
- Die Kosten sind üblicherweise nicht in den ursprünglichen Kosten der Betreiber berücksichtigt.

Wegen der hohen Kosten, bei Investitionsgütern ca. 16% der gesamten Produktlebenszykluskosten (LCC) [Geis09], versuchen viele Betreiber Umbaumaßnahmen zu vermeiden, zu verringern oder auf den spätest möglichen Zeitpunkt zu verschieben. Dieses Vorgehen hat Auswirkungen auf den Umbauprozess. Es entsteht ein hoher Kosten- und Termindruck für den Dienstleister. Dieser wirkt sich negativ auf die Qualität und den investierten Aufwand aus.

Prognosen der Lebenszykluskosten sind risikobehaftet und können nur unter Annahmen aufgestellt werden. Ein Beispiel aus der Maritimen Industrie soll dieses Problem verdeutlichen: Um die Umweltauflagen für Emissionen zu erfüllen [IMO05], haben Reeder unterschiedliche technologische Möglichkeiten [Walt12]. Die Auflagen beinhalten verschiedene Richtwerte für definierte Zonen der Weltmeere. Für eine genaue Kostenkalkulation muss der Reeder daher unterschiedliche Faktoren abschätzen: die Preisentwicklung der Treibstoffkosten, den Nutzungsgrad der neuen Komponenten, den Verkehrsgrad in den stark reglementierten Zonen, usw. [Ship12]. Üblicherweise erstreckt sich das Fahrgebiet der Schiffe über mehrere unterschiedlich reglementierte Zonen, so dass der Reeder das zukünftige Fahrprofil prognostizieren muss. Dies führt zu Unsicherheiten über die Rentabilität der Anlagen. Ähnliche Richtlinien existieren für Industrieanlagen [Aert00].

Im beschriebenen Beispiel aus der Schifffahrt treten die Emissionsgrenzen zu festgelegten Zeitpunkten in Kraft. Um den Ausfall der Schiffe möglichst gering zu halten, terminieren die Reeder die Umbauzeitpunkte auf die bereits geplanten Docktermine der Schiffe. Diese häufig engen zeitlichen Randbedingungen und zum Teil lange Vorlaufzeiten für Material erschweren es dem Generalauftragnehmer den Retrofit-Prozess termingerecht abzuschließen.

2.2.4 Defizite in der Literatur beschriebener Umbauprozesse

Umbauprozesse komplexer Investitionsgüter bestehen aus sechs Phasen (vgl. Abbildung 2-3). Aus der Literatur ist bekannt, dass bei Neuentwicklungen die Kosten in den ersten Phasen (Produktentwicklung, Konstruktion) eines Projekts festgelegt werden und meist erst in den späteren Phasen (Fertigung, Montage) entstehen [Ehrl07]. Die Kostenfestlegung bei Umbauprojekten komplexer Investitionsgüter folgt diesem Muster, es existieren allerdings Projekte mit einem noch steileren Anstieg der Kostenentstehungsfunktion in den frühen Phasen [Tito15]. Abbildung 2-4 stellt die Kostenentstehung eines Beispielprojekts in einem Wasserfalldiagramm vom Angebot bis zum Umbau dar. Die Kosten sind dabei in Planungs- und Fertigungskosten unterteilt. Die Kosten der Angebotsvorbereitung betragen mehr als ein

Fünftel der Gesamtkosten. Diese Arbeit betrachtet im Schwerpunkt Projekte mit vergleichbaren Kostenentstehungsfunktionen.

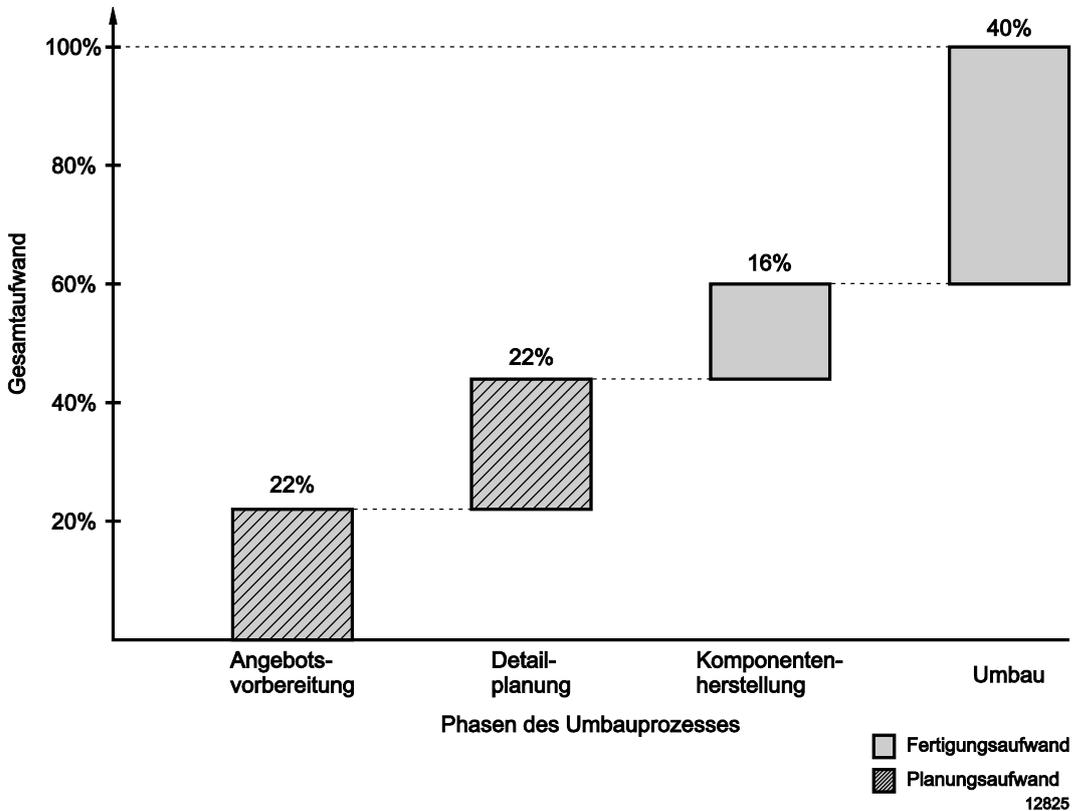


Abbildung 2-4: Aufwandsverteilung eines Umbauprozesses [Tito15]

Obwohl die Auftragswahrscheinlichkeit bei Umbauprozessen mit durchschnittlich 32% [Diet13] höher liegt als bei neuen Produkten mit lediglich 10-25% [Bank04] [Klei98], ist der investierte Aufwand ein hohes Risiko für den Generalauftragnehmer. Nimmt der Kunde das vorgelegte Angebot nicht an, bleibt der gesamte Aufwand beim Anbieter. Das Ziel, den Aufwand für die Angebotserstellung zu reduzieren und gleichzeitig die Qualität des Angebots zu bewahren oder sogar zu steigern, ist somit von essentieller Bedeutung für den Generalauftragnehmer.

2.3 Angebotserstellung

In diesem Abschnitt wird die Angebotserstellung genauer untersucht. Abschnitt 2.3.1 gibt zunächst eine Definition und grenzt die betrachteten Angebote ab. Der folgende Abschnitt 2.3.2 bewertet die Angebotserstellung in den drei Zieldimensionen Zeit, Kosten und Qualität.

2.3.1 Beschreibung und Abgrenzung

Der VDI beschreibt ein Angebot als eine Bewerbung um einen Auftrag [VDI4504b]. Die DIN4991 beschreibt den Aufbau und Inhalt eines Angebots. Abhängig von Auftragswahrscheinlichkeit, Realisierbarkeit, Komplexität der Güter und vorhandenen Eingangsinformationen kann eine solche Bewerbung in drei Formen vorliegen [Klei98]:

- Leistungsübersicht (Kontaktangebot)
- Richtpreis- oder Budgetangebot
- Festpreisangebot

Bei der Leistungsübersicht handelt es sich um ein Katalogangebot mit überschlägigen Preisen und Standardleistungen, die nicht auf den Kunden zugeschnitten sind [Klei98]. Bei den hier betrachteten Umbaumaßnahmen kommt diese Form nicht vor.

Richtpreis- oder Budgetangebote sind auf den Kunden zugeschnitten und beinhalten konkrete Zeichnungen und Berechnungen. Für die Kalkulation schätzt der Anbieter die zu erbringenden Leistungen ab. Die Abrechnung erfolgt später auf Basis der tatsächlich angefallenen Kosten nach den Richtpreisen des Angebots. Diese Form ist besonders im Bauwesen üblich [Girm06].

Bei einem Festpreisangebot verpflichtet sich der Anbieter, die Leistung zu dem angegebenen Preis zu erbringen. Er arbeitet das Angebot sehr detailliert aus und beschreibt alle zu erbringenden Leistungen im Detail [Klei98]. Nimmt der Kunde das Angebot an, hat er Anspruch auf die aufgeführten Maßnahmen und kann diese nachträglich ohne Mehraufwand beanstanden.

Für den Umbau komplexer Investitionsgüter fertigen Generalauftragnehmer in der Regel Richt- oder Festpreisangebote an. Dies hat einen hohen Aufwand in der Angebotserstellung zur Folge. Nach Kleinaltenkamp sinkt der Standardisierungsgrad der Angebote mit steigender Komplexität der Maßnahmen [Klei98]. Es ist in der Regel nicht möglich, die Angebotserstellung bspw. durch standardisierte Preislisten oder die Verwendung von Standardwerkzeugen in jedem Teilschritt zu automatisieren. Der Individualisierungsgrad der Angebote ist dadurch sehr hoch und bei Nichtannahme kann der Generalauftragnehmer das Angebot nicht auf andere Kunden übertragen. Diese Problematik erfordert ein gutes Angebotsmanagement. Der VDI hat, aufbauend auf einer Befragung von 300 Unternehmen [Schm08], eine Richtlinie für die Angebotserstellung im Industriegütergeschäft entwickelt [VDI4504a/b]. Die Richtlinie enthält ein dreistufiges Vorgehen (Teilprozesse) mit jeweils mehreren Prozessschritten. Diese sind mit detaillierten Aufgaben versehen.

Der erste Schritt ist die Anfrageerfassung und -bewertung. Hierbei sammelt der Anbieter alle benötigten Informationen über das Projekt. Häufig löst eine Ausschreibung die Angebotserstellung aus. Diese enthält die Rahmenbedingungen zum Projekt. Der Anbieter prüft die Machbarkeit der angestrebten Lösung aus technischer und kaufmännischer Sicht und bewertet die eigenen Auftragschancen. Am Ende trifft das Unternehmen die Entscheidung, ob es ein Angebot anfertigt. Die Komplexität des Vorhabens definiert den Aufwand dieser Phase. Die VDI-Richtlinie beschreibt das Ende der Phase als einen möglichen Abbruchpunkt im Projekt.

In der zweiten Phase erstellt der Anbieter das eigentliche Angebot. Am Anfang erstellt er dafür einen Projektplan und erarbeitet die Lösung – aus technischer und kaufmännischer Sicht. Der VDI beschreibt den Konflikt zwischen der Kostenseite und dem Anpassen der Lösung an einen spezifischen Fall als besonders herausfordernd. Um die Auftragswahrscheinlichkeit zu steigern, sollten Alleinstellungsmerkmale der Lösung vorliegen. Diese sollte das Unternehmen ausarbeiten und besonders hervorheben. Nach einer Kalkulation und Aufbereitung des Angebots übergibt der Anbieter dem Kunden das Angebot.

Im letzten Schritt verfolgt der Anbieter das Angebot und wertet die Annahme oder Nicht-Akzeptanz durch den Kunden aus. Dabei berücksichtigt er die Verhandlungsstrategie und eventuelle Möglichkeiten um das vorgelegte Angebot anzupassen. Abbildung 2-5 stellt das beschriebene Vorgehen nach VDI grafisch dar.

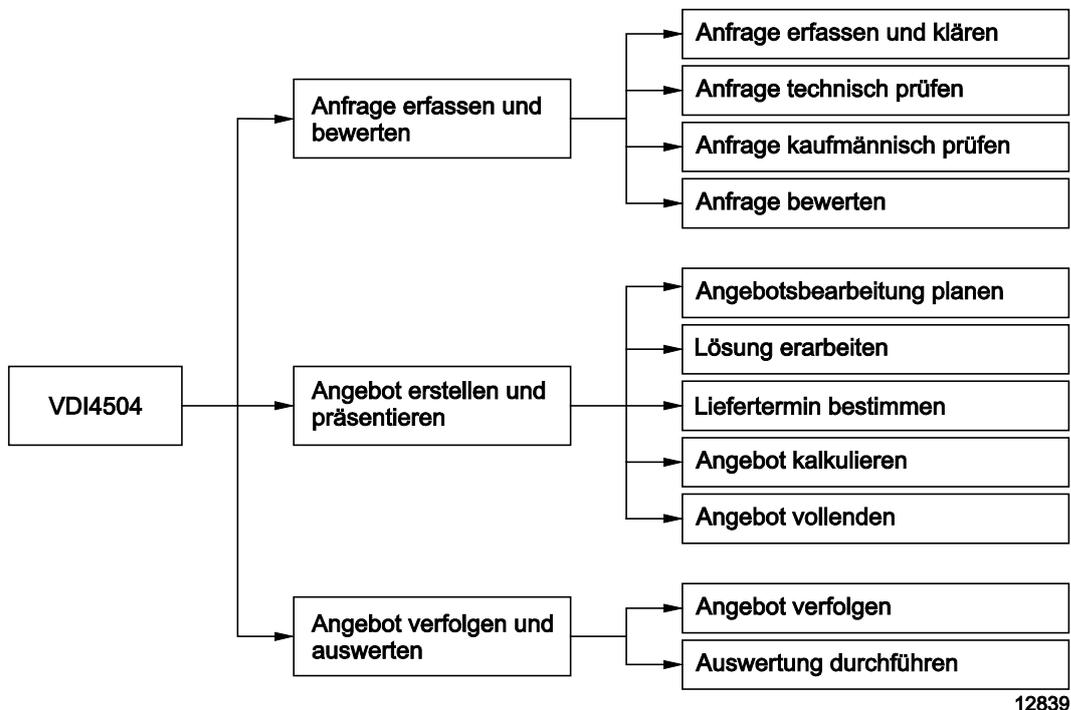


Abbildung 2-5: Aufbau der Angebotserstellung für Industriegüter [VDI4504]

Der vom VDI erarbeitete Prozess zielt nicht auf Angebote für den Umbau komplexer Investitionsgüter ab. Einige spezielle Anforderungen, wie die Erhebung der Ist-Situation fehlen, sind für den Umbau allerdings unerlässlich. Der Angebotserstellungsprozess nach der VDI-Richtlinie ist für Umbauprozesse komplexer Investitionsgüter nicht direkt geeignet und muss daher angepasst werden.

Ein dem Umbau ähnliches Feld ist die Instandhaltung (Maintenance, Repair and Overhaul – MRO)(vgl. Unterabschnitt 2.2.1), da ebenfalls eine Bestandsaufnahme erfolgen muss. Eickemeyer beschreibt dafür einen Prozess für die Regeneration komplexer Investitionsgüter [Eick14]. Nach einer Eingangsinspektion demontiert der Instandhaltungsanbieter das Objekt. Anschließend erfolgen eine Reinigung und eine Befundung des Schadens. Darauf aufbauend ergeben sich verschiedene Möglichkeiten das Problem zu beheben (Reparatur, Neuteil) [Steg03]. Der Instandhaltungsanbieter bindet den Kunden an mehreren Stellen im Prozess ein und lässt ihn über das weitere Vorgehen entscheiden. Danach remontiert er die (Neu-)Teile und führt abschließend Tests durch.

Anders als bei der VDI-Richtlinie berücksichtigt der Prozess das vorhandene Produkt und die Erfassung des Ist-Zustands (Befundung). Der wesentliche Unterschied zu Umbauprozessen besteht im unterschiedlichen Fokus (Reparatur) und der vorliegenden Vertragsform zwischen dem Kunden und dem Instandhaltungsanbieter. Das Ziel von MRO-Prozessen ist es, die Funktionen des Produkts wiederherzustellen, der geometrische Zustand bleibt dabei in der Regel unverändert. Weiterhin sind die Verträge im Voraus geschlossen. Eine klassische Angebotserstellung, wie bei den hier betrachteten Umbaumaßnahmen, ist durch die vorhandenen Verträge und den Standardcharakter der Teile nicht vorhanden.

Aus den beschriebenen Gründen ergibt sich das **erste Problem** für die Angebotserstellung von Umbaumaßnahmen: Ein vollständiger Standardprozess für die Erstellung von Angeboten für den Umbau komplexer Investitionsgüter ist nicht vorhanden.

2.3.2 Defizite der Angebotserstellung

Dieser Abschnitt betrachtet die vorhandenen Prozesse zur Angebotserstellung und leitet die Defizite anhand der drei Zieldimensionen Qualität, Kosten und Zeit ab. Die Betrachtung dieses sog. magischen Dreiecks hat sich im Projektmanagement und in der Produktion in der Vergangenheit bewährt [Kust11].

Qualität

Nach DIN beschreibt Qualität den Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt [DIN9000]. Dabei sind inhärente Merkmale alle objektiv messbaren Merkmale. Im Folgenden verwendet die Arbeit den Begriff Qualität als den Grad, in dem die Merkmale eines Produkts die Anforderungen erfüllen.

Für die Qualität der Angebotserstellung sind zwei Aspekte besonders relevant: Die Qualität der Präsentation und die Qualität des Angebots. Die VDI-Richtlinie verweist auf eine hohe Qualität der Präsentation beim Kunden. Dafür schlägt die Richtlinie eine Ausarbeitung im „Red-Team-Review“ vor. Ein objektives Gremium aus verschiedenen, nicht am Angebotsprozess beteiligten Teilnehmern bewertet das Angebot und die Präsentation.

Der zweite Aspekt, die Qualität des Angebots, ist für den Generalauftragnehmer entscheidend. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, sind die meisten Angebote ein Festpreisangebot. Eine Abweichung der Kosten von den Planwerten kann Verluste für den Generalauftragnehmer verursachen. Eine wichtige Einflussgröße ist der Anteil der Eigen- und der Fremdleistung. Bei Umbaumaßnahmen kann der Fremdleistungsanteil sehr groß werden, da neben der Komponentenfertigung Vergaben für die De-/Montagetätigkeiten und Planungsaufgaben üblich sind. Im Minimalfall fungiert der Generalauftragnehmer als Projektmanager.

Vier Faktoren erscheinen für die Qualität des Angebots als besonders wichtig im gesamten Prozess:

1. Die Planung des Vorgehens zur Angebotserstellung beeinflusst maßgeblich die Qualität. VDI4504 untersucht das Risiko des Generalauftragnehmers mit einer anfänglichen Bewertung, bspw. SWOT-Analyse. Erst nach dieser Untersuchung definiert der Generalauftragnehmer die Angebotsstrategie. Unterschiedliche Strategien erfordern unterschiedlich hohen Aufwand in der Angebotserstellung und führen zu einer unterschiedlich hohen Qualität des Angebots. Generell sind sehr viele Schritte, Absicherungen, Planungen, Analysen etc. möglich. Bei der Angebotserstellung von Umbaumaßnahmen muss der Generalauftragnehmer den Aufwand in der Regel begrenzen. Die ausführenden Unternehmen schätzen daher einen Teil der Tätigkeiten ab.

2. Eine realistische Kosten- und Aufwandsschätzung erhöht die Qualität des Angebots. Dies ist in der Angebotserstellung allerdings schwer realisierbar, da sehr viele Faktoren die finale Kapazitäts- und Kostenbestimmung beeinflussen. Spezifische Vorgaben vom Kunden während der Angebotserstellung stellen einen besonders hohen Risikofaktor dar. Eine Möglichkeit, dieses Risiko zu minimieren, wären vertraglich geregelte Rahmenbedingungen für Änderungen. Dies würde allerdings einen Vertrag während der Angebotserstellung erfordern. In vielen Projekten ist dies

nicht realisierbar. Der Prozess muss dementsprechend auf mögliche Änderungen reagieren können, sodass die Wünsche der Kunden nur ein geringes Risiko darstellen. Den Kunden in die wichtigsten Prozessentscheidungen zu integrieren, könnte dieses Problem beheben.

3. Häufig vernachlässigen es Unternehmen, die Durchführbarkeit der geplanten Maßnahmen abzusichern [Hein15]. Dies gilt gleichermaßen für Montagevorgänge wie für Betriebsabläufe (bspw. die Zugänglichkeit für Wartungstätigkeiten). Obwohl die meisten Komponenten mit modernen IT-Werkzeugen konstruiert und geplant sind, verzichten Generalauftragnehmer häufig auf Absicherungen in der Phase der Angebotserstellung, obwohl diese wegen der Komplexität der durchzuführenden Umbauten sinnvoll wären. Folge sind häufig Probleme bei der späteren Montage und im Betrieb – Nacharbeit und zusätzliche Kosten sind die Regel.

4. Erfahrungswissen aus früheren Projekten verbessert die Qualität der aktuellen Angebote. Der VDI schlägt vor, Erfahrungen aus alten Angeboten strukturiert in einer Datenbank zu erfassen, um die Sicherheit der geplanten Maßnahmen zu erhöhen. Aufgrund der unterschiedlichen Maßnahmen und Rahmenbedingungen der Projekte ist jedoch fast jede Umbaumaßnahme eine Einzellösung. Es fehlen momentan geeignete Kennzahlen für Umbauprozesse, um eine solche Datenbank systematisch zu füllen.

Aus den beschriebenen Aspekten ergibt sich das **zweite Problem** der Angebotserstellung von Umbaumaßnahmen: Die Angebote basieren häufig auf groben Abschätzungen, sodass die Qualität dadurch momentan nicht ausreichend ist.

Kosten

Die Kosten eines Unternehmens setzen sich aus unterschiedlichen Kostenarten zusammen (bspw. Maschinenkosten, Mitarbeiterkosten). Aufgrund der vorrangig manuellen Tätigkeiten sind für die Angebotserstellung insbesondere die Mitarbeiterkosten ausschlaggebend. Da die Kosten je Arbeitsstunde weitgehend fest sind, konzentriert sich die Arbeit auf die Arbeitsproduktivität als operative Zielgröße zur Steuerung der Mitarbeiterkosten. Die Produktivität ist allgemein als das Verhältnis des Outputs zum Input definiert [Bokr06]. Für die Arbeitsproduktivität bei der Angebotserstellung ist das gefertigte Angebot der Output und der investierte Aufwand an Mitarbeiterstunden der Input.

Der Output lässt sich generell in Mengen- oder Geldeinheiten bewerten [Czum13]. Der Generalauftragnehmer kann den Output durch zusätzliche Dokumente oder Visualisierungen verändern. Eine Bewertung in Mengeneinheiten ist jedoch nicht zielführend, da sich das Angebot und eventuelle Zusatzdokumente nicht problemlos vergleichen lassen. Eine Bewertung mit Geldeinheiten erscheint an dieser Stelle als

ungeeignet, da der Kunde für die Angebotserstellung in der Regel nichts zahlt. Unter der Annahme, dass der Output daher immer ein vollständiges Angebot ist und sich die Anzahl der Angebote nicht sinnvoll beeinflussen lässt, ist der Input die wichtigste Stellgröße für die Produktivität. Dabei ist der Zielkonflikt mit der Betrachtung der Qualität zu beachten, da eine Steigerung der Qualität in der Regel durch gesteigerten Input erreicht werden kann.

Für den Generalauftragnehmer, der einem Kunden ein Angebot unterbreitet, ist neben dem beschriebenen Aufwand an Mitarbeiterstunden die Auftragswahrscheinlichkeit entscheidend. Diese hängt neben der Qualität im Wesentlichen von den Gesamtkosten und der angebotenen Leistung ab. Der investierte Aufwand in der Angebotserstellung ist für den Generalauftragnehmer aufgrund des Kostenvorschusses ein Risikofaktor (vgl. Abschnitt 2.2.4). An dieser Stelle sollen Faktoren für den hohen Aufwand identifiziert werden.

Nach der VDI-Richtlinie 4504 setzt sich die Angebotserstellung aus insgesamt elf Prozessschritten mit 51 Aufgaben zusammen. Für die Anwendung bei Umbauprozessen muss diese Richtlinie jedoch erweitert werden (vgl. Abschnitt 2.3.1). An zwei Stellen ist der Aufwand als sehr hoch einzustufen und wird daher näher betrachtet:

1. Ein kritischer Punkt bei Umbauprojekten ist die Erfassung relevanter Informationen über das umzubauende Produkt. In der Regel liegen kaum Informationen über die Umgebung vor, sodass eine Erfassung der Geometrie notwendig ist. Es existieren mehrere Technologien (bspw. Laserscanning) auf dem Markt. Diese sind jedoch nicht für eine zielgerichtete Erfassung von Geometrien für Umbauprozesse entwickelt. Dies führt zu hohen Aufwänden für den Generalauftragnehmer.

2. Der Kunde stellt am Anfang des Prozesses seine Anforderungen an das neue System zusammen. Die VDI-Richtlinie verweist auf die Bedeutung der Zusammenarbeit an den benötigten Stellen im Prozess, um diese Anforderungen richtig zu deuten und umzusetzen. Wie diese Zusammenarbeit aussehen kann, ist an dieser Stelle nicht definiert. Die Entscheidungsträger sind in der Regel keine Konstrukteure und vertreten Interessen wie niedrige Betriebskosten, gute Wartungszugänglichkeiten und geringer Veränderungsgrad durch die Maßnahme. Auf der anderen Seite legt der Generalauftragnehmer besonderen Wert auf Funktionalität und den eigenen Aufwand. Die unterschiedliche Herangehensweise an das Problem und der unterschiedliche Fokus machen eine Kommunikation zwischen den beiden Parteien aufwändig [Koch04]. Der Aufwand einzelne Teilaspekte zu verdeutlichen ist sehr groß (bspw. durch Zeichnungen, Schablonen, 3D-Druck, Virtual Reality etc.) und wird deshalb häufig gemieden. Es entsteht eine Kommunikationsbarriere zwischen dem Kunden und dem Generalauftragnehmer.

Aus den beschriebenen Aspekten ergibt sich das **dritte Problem** für die Angebotserstellung von Umbaumaßnahmen: Die geringen Auftragswahrscheinlichkeiten rechtfertigen den zum Teil sehr hohen Aufwand der Generalauftragnehmer für die Angebotserstellung nicht.

Zeit

Als zeitliche Zielgröße verwendet die vorliegende Arbeit die Durchlaufzeit des Angebots. Die Durchlaufzeit eines Auftrags ist definiert als die Zeitdauer zwischen der Auftragsfreigabe und dem Bearbeitungsende [Loed08]. Für die Angebotserstellung entspricht dies dem Zeitraum zwischen dem Erstkontakt des Kunden und des Generalauftragnehmers oder dem Beginn der Bearbeitung der Ausschreibung (je nachdem was zuerst stattfindet) und der finalen Abgabe des Angebots.

Bei Umbauprozessen ist die Durchlaufzeit der Angebotserstellung häufig vom Kunden vorgegeben. Ausschreibungen definieren den spätesten Einreichungstermin des Angebots. Bei einem direkten Kontakt zwischen Kunde und Generalauftragnehmer koordiniert der Kunde die Abgabe des Angebots über die Terminierung des gewünschten Umbauzeitpunkts. Der Generalauftragnehmer kann durch erhöhte Kapazitäten darauf reagieren, um den benötigten Aufwand in der vorgegebenen Zeit zu leisten. Für ihn stellt die Durchlaufzeit damit eher eine Rahmenbedingung, als einen direkten Wettbewerbsfaktor dar. Diese Arbeit betrachtet daher im Folgenden Verlauf hauptsächlich die Qualität und die Kosten.

2.4 Ansätze zur Verbesserung der Produktivität und der Qualität

Die Qualität und die Kosten eines Angebots stehen im Konflikt zueinander. Unterschiedliche auf dem Markt vorhandene Methoden und Werkzeuge bieten Potenzial beide Dimensionen zu verbessern. Verschiedene Technologien haben in den letzten Jahren einen Sprung gemacht und sind industriell einsetzbar geworden [Gart14]. Der vorliegende Abschnitt stellt Technologien vor, die Ansätze liefern, um die Produktivität der Angebotserstellung zu erhöhen und gleichzeitig die Qualität zu verbessern. Dazu zählen Technologien zur Erfassung und Weiterverarbeitung der Ist-Geometrie (2.4.1) sowie Technologien wie Virtual (2.4.2) und Augmented Reality (2.4.3). Abschnitt 2.4.4 zeigt die Einsatzgrenzen der Technologien auf und fasst die Defizite abschließend zusammen.

2.4.1 Technologien zur Geometrieerfassung

Bei Umbaumaßnahmen ist das Produkt bereits physisch vorhanden. Durch die Komplexität der Geometrie, die lange Lebensdauer und die häufigen Wartungszyklen verändert sich das Produkt von der Konstruktionsphase über die Bau- und Betriebsphase bis zum Umbauzeitpunkt. Man unterscheidet die drei Zustände: As-designed, as-built und as-is [Knab08][Pett05][Roen14]. In der Regel erhalten Kunden

bei der Auslieferung des Investitionsguts kein CAD-Modell vom Hersteller. Nach einigen Betriebsjahren hat sich das Produkt verändert und es ist sehr wahrscheinlich, dass einige Bereiche deutlich anders sind als bei der Entwicklung geplant. Deshalb ist es notwendig, die vorhandenen Geometrien zu erfassen. Dafür existieren unterschiedliche Ansätze, bei denen sich folgende Fragen ergeben:

- Welcher Teil des Produkts muss erfasst werden?
- Welche Technologie eignet sich zur Geometrieerfassung?
- Wie können die Daten weiterverarbeitet werden?

Welcher Teil des Produkts muss erfasst werden?

Bei Umbauprojekten ist eine Geometrieerfassung des gesamten Objekts üblicherweise nicht erforderlich [Kaes04]. Soll bspw. ein Generalauftragnehmer eine neue Pumpenanlage in eine Chemieanlage einbauen, sind nur der betroffene und die umliegenden Bereiche interessant.

Die meisten Geometrieaufnahmen führen externe Dienstleister durch. Die Generalauftragnehmer besitzen dafür weder die erforderlichen Messgeräte noch das notwendige Know-how. Eine Definition der Anforderungen ist daher entscheidend für den investierten Aufwand und die anschließende Qualität der Geometriemodelle.

Welche Technologie eignet sich zur Geometrieerfassung?

Die klassische Methode um Geometrien zu vermessen ist die manuelle Vermessung zwischen zwei Punkten. Eine Alternative dazu ist das terrestrische Laserscanning, das sich in den letzten Jahren immer weiter durchgesetzt hat. Weitere Technologien, die aktuell erforscht werden, sind die Photogrammetrie und die Vermessung mit 3D-Kameras. Dieser Teilabschnitt beschreibt zunächst das Funktionsprinzip dieser Technologien und stellt die benötigten Ressourcen für eine solche Aufnahme, das Ergebnis, sowie die Vor- und Nachteile der Verfahren dar.

Manuelle Vermessung

Die manuelle Vermessung basiert auf der Abstandsmessung zwischen zwei beliebigen Punkten. Die einfachste, im Haushalt benutzte Form, ist ein Lineal. In der Industrie setzen die Unternehmen dafür typischerweise Ultraschall- oder Laser-Entfernungsmesser ein.

Das Verfahren ist einfach durchzuführen, in der Regel bereits verfügbar und kostengünstig. Der Dienstleister kann das Maß direkt aufnehmen, das er benötigt. Der größte Nachteil ist die Aufnahme von nur einem Maß pro Messung. Für die hier

vorliegende Problemstellung ist dieses Verfahren dadurch nicht geeignet. Im weiteren Verlauf dient es als Referenz für die anderen Verfahren.

- Ressourcen: Messgerät
- Ergebnis: einzelne Maße
- Vorteile: direkte Einsetzbarkeit, niedrige Kosten für das Messgerät
- Nachteile: begrenzte Anzahl der Maße

Terrestrisches Laserscanning

Das terrestrische Laserscanning ist ein stationäres, laserbasiertes Streckenmessverfahren, das in einem Rasterverfahren automatisiert alle Entfernungen zum Gerät in horizontaler und vertikaler Richtung erfasst [Dona08]. Das Ergebnis ist eine Punktwolke mit X, Y und Z-Koordinaten. Für eine vollständige Aufnahme bedarf es mehrerer Aufnahmen aus unterschiedlichen Standpunkten. Die typischen Einsatzfelder des Verfahrens sind die Vermessung von Landschaft (Geodäsie) und Gebäuden.

Abhängig von der Genauigkeit und den gewünschten Farbinformationen ist das Verfahren sehr schnell – eine Aufnahme kann nur wenige Minuten benötigen. Das erlaubt mehrere Aufnahmen in einem Raum ohne großen zeitlichen Aufwand. Die Abweichungen betragen dabei normalerweise weniger als einen Millimeter. Die Geräte sind transportabel und von einer Person bedienbar.

Laserscanner sind relativ teuer und der Bediener muss ein Vermessungsexperte sein, wodurch die Betriebskosten ebenfalls hoch sind. Viele Unternehmen greifen daher häufig auf Dienstleister zurück. Ein weiterer Nachteil ist die Weiterverarbeitung der Punktwolken. Diese müssen nach der Aufnahme referenziert, zusammengesetzt und anschließend nachbearbeitet werden (postprocessing). Letzteres ist üblicherweise mit manuellem oder teilautomatisiertem Nachkonstruieren verbunden. Der Aufwand steigt mit der Anzahl der Aufnahmen an. Die eigentliche Aufnahme macht oft nur etwa 10% des Gesamtaufwands aus [Jahn04].

- Ressourcen: Laserscanner, Vermessungsingenieur
- Ergebnis: Punktwolken einzelner Aufnahmen
- Vorteile: hohe Genauigkeit, hohe Geschwindigkeit
- Nachteile: Technologiekosten, Personalkosten

Photogrammetrie

Bei der Photogrammetrie gewinnt der Benutzer die benötigten Informationen aus Bildern mit einer kalibrierten Kamera [Krau04]. Er vermisst dabei Objekte oder

Entfernungen in den Bildern. Der Einsatz von künstlichen Markern in der Umgebung ermöglicht eine sehr hohe Genauigkeit des Verfahrens. Ein weiterer Bestandteil der Photogrammetrie ist das Lokalisieren einzelner Bilder zueinander. Liegen ausreichend viele Aufnahmen vor, ermöglichen Algorithmen die automatisierte Rekonstruktion eines Objekts [Foeh90][Rott98]. Die Algorithmen benötigen dafür jedoch sehr viele Aufnahmen und die Qualität hängt stark von der Anzahl der Perspektiven ab.

Die Vermessung einzelner Entfernungen mit Hilfe der Photogrammetrie liefert sehr genaue Ergebnisse [Luhm01]. Dafür ist kein Expertenwissen notwendig und der benötigte Zeitaufwand ist gering. Bei der Anwendung müssen allerdings die benötigten Strecken bekannt sein. Der Vermesser positioniert die Marker an die entsprechenden Oberflächen. Daraus ergibt sich gegenüber der manuellen Vermessung nur der Genauigkeitsvorteil. Benötigt der Dienstleister nur wenige Maße, bspw. um die vorhandenen Generalpläne zu validieren, bietet sich die Verwendung des Verfahrens an, weil auch der Kunde die Vermessung ohne zusätzliche Ausrüstung übernehmen kann.

- Ressourcen: Kalibrierte Digitalkamera
- Ergebnis: einzelne Maße oder Oberflächenmodell
- Vorteile: Aufnahme kann durch ungeübtes Personal erfolgen, eine einfache Digitalkamera ist ausreichend, keine zusätzliche Ausrüstung ist notwendig. Nur die anschließende Bearbeitung erfordert Experten.
- Nachteile: begrenzte Anzahl der Maße, sehr viele Bilder werden benötigt

3D-Kameras

Die Geometrieerfassung mit 3D-Kameras hat sich in den letzten Jahren erheblich weiterentwickelt. Mit Einführung der Microsoft Kinect im Jahr 2010 steht ein kostengünstiger Sensor zur Verfügung. Die verbauten Komponenten (Infrarotemitter und -kamera) ermöglichen ein dreidimensionales Abbild der Umgebung. Die RGB-Videokamera nimmt gleichzeitig Farbinformationen der Umgebung auf. Ein Algorithmus wertet in Echtzeit die Daten aus und erzeugt ein Oberflächenmodell der aufgenommenen Objekte [Izad11].

Der Algorithmus stellt den aktuellen Stand des Modells in Echtzeit dar. Der Benutzer sieht dadurch, was er bereits aufgenommen hat und wo noch Lücken im Modell sind. Außerdem kann er direkt nacharbeiten. Das Verfahren ist dynamisch und der Benutzer kann sich mit der Kamera innerhalb vom Algorithmus gegebener Grenzen bewegen. Die Qualität der Aufnahmen ist hoch und der Fehler kann auf bis zu einen Zentimeter gesenkt werden [Whel12].

2 Situationsanalyse und Grundlagen

- Ressourcen: 3D-Kamera, Vermessungsrechner
- Ergebnis: Oberflächenmodell
- Vorteile: kontinuierliche Aufnahme der Umgebung, direkte Visualisierung der Aufnahme
- Nachteile: geringe Genauigkeit, Aufnahme ist auf ein durch die Kamera vorgegebenes Volumen beschränkt, Verbindung zwischen Kamera und Rechner

Abbildung 2-6 stellt die Eigenschaften der Technologien zusammenfassend gegenüber und zeigt typische Einsatzfelder.

Eigenschaft	Manuelle Vermessung	Laserscanning	Photogrammetrie	3D-Kameras
Genauigkeit	hoch	sehr hoch	sehr hoch	mittel
Aufnahmegeschwindigkeit	sehr gering	sehr hoch	mittel	mittel bis hoch
Farbinformation	nein	zum Teil	ja	ja
Output	einzelne Messwerte	Punktwolken	Fotos	Oberflächen
Typische Einsatzfelder	Gebäude, Gelände	Gebäude, Gelände, einzelne Objekte	Gelände, einzelne Objekte	Einzelne Objekte

12828

Abbildung 2-6: Vergleich der Eigenschaften von Aufnahmetechnologien

Für die Aufnahme von Ist-Geometrien komplexer Investitionsgüter sind die hier vorgestellten Verfahren auf unterschiedliche Art geeignet. Jedes der Verfahren besitzt spezifische Einsatzfelder. Die manuelle Vermessung und die Photogrammetrie finden in der schnellen Einzelpunktmessung Anwendung. Terrestrisches Laserscanning ist für sehr viele Szenarien einsetzbar. Das Vermessen mit 3D-Kameras befindet sich momentan noch in der Entwicklung und liefert Potenziale, die Aufnahmen an mehreren Stellen zu unterstützen. Es existieren momentan jedoch nur Verfahren für eine Aufnahme eines stark limitierten Volumens, da sowohl Hardware und Algorithmen aus der Spieleindustrie kommen und einen anderen Anwendungszweck verfolgen.

Wie können die Daten weiterverarbeitet werden?

Der Wunsch und häufig die Forderung des Generalauftragnehmers ist es, ein vollständiges 3D-Modell (Planungsmodell) der vorhandenen Struktur zu haben. Die beschriebenen Technologien liefern eine große Menge an Rohdaten. Diese Daten lassen sich nicht ohne weiteres direkt in der weiteren Planung verwenden. Zunächst ist dafür eine Verarbeitung der Daten notwendig. Diese Nachbearbeitung richtet sich nach dem Ergebnis der Vermessung (einzelne Maße, Punktwolken, Oberflächenmodelle)

Einzelne Maße

Einzelne Maße benutzt der Generalauftragnehmer in der Regel, um die Generalpläne zu validieren oder fehlende Maße nachzutragen. Die Erzeugung eines Planungsmodells würde sehr viele einzelne Maße erfordern und ist nur in Verbindung mit einer vorhandenen Standardgeometrie möglich.

Punktwolken

Zunächst filtert der Dienstleister die Punktwolken und setzt diese anschließend zusammen. Unterschiedliche Ansätze unterstützen die Zusammensetzung, zum Beispiel das semiautomatische Referenzieren der Punktwolken [Kers05][Paff13]. Die Nachbearbeitung von zusammengesetzten Punktwolken zu einem Planungsmodell kann manuell, teilautomatisiert oder über eine Vermaschung erfolgen. Bei manuellen Verfahren konstruiert der Konstrukteur die Geometrien anhand der Punktwolke nach. Unterschiedliche teilautomatisierte Methoden unterstützen den Konstrukteur. Nach einer anfänglichen Vorauswahl des Konstrukteurs erkennen intelligente Algorithmen Standardbauteile [Wund04] oder ebene Flächen wie Wände oder Böden [Vinc12][Wilk02]. Eine automatisierte Vermaschung erzeugt ein Oberflächenmodell der erfassten Geometrie. Für Strukturen wie bspw. Gelände liefert die Vermaschung gute Ergebnisse, verbaute Strukturen wie bspw. Räume weisen Fehler auf und eine manuelle Nachbearbeitung ist erforderlich [Dona08].

Oberflächenmodelle

Oberflächenmodelle, unabhängig von deren Erzeugung, liegen in der Regel als ein Bauteil vor und weisen keine eindeutige Baumstruktur auf [Bren01]. Dadurch ist es nicht möglich bspw. ein Rohr auszuwählen und zu verschieben oder einen Tisch zu manipulieren. Die Objekte muss ein Konstrukteur manuell oder teilautomatisiert separieren. Weiterhin ist eine Anreicherung der Modelle mit Metainformationen notwendig [Scha14].

Abbildung 2-7 stellt die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Technologien zur Vermessung, den Rohdaten und dem angestrebten Planungsmodell dar. Die Aufwände der einzelnen Nachbearbeitungsschritte sind sehr unterschiedlich und hängen direkt mit den vorgegebenen Randbedingungen zusammen.

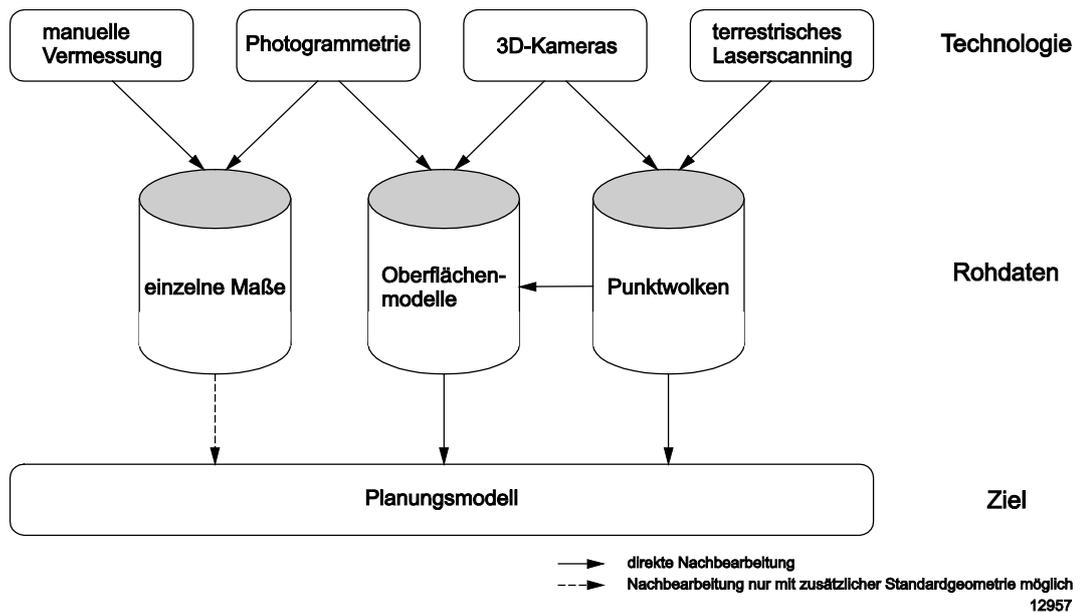


Abbildung 2-7: Erzeugung eines Planungsmodells

2.4.2 Virtuelle Realität

Die Virtuelle Realität oder Virtual Reality (VR) ist die Darstellung einer virtuellen Welt in Echtzeit. Das Ziel ist es, den Benutzer komplett in diese Welt zu integrieren und von der realen zu entkoppeln. Man spricht von sog. Immersion [Rund07]. Die Virtuelle Realität ist Teil der Virtuellen Technologien und ist auf dem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum von Milgram ganz rechts dargestellt, Abbildung 2-8.

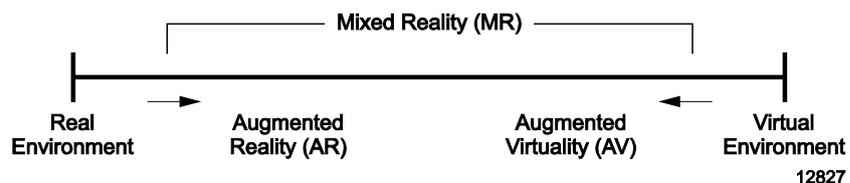


Abbildung 2-8: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum [nach Milg94]

Ziel des Einsatzes von Virtueller Realität in der Produkt- und Prozessentwicklung ist es, Probleme frühzeitig zu identifizieren und dadurch Fehler zu vermeiden. Es ersetzt Prototypen, indem es Modelle realitätsgetreu darstellt und als interdisziplinäre Kommunikationsplattform dient. Durch den Einsatz soll die Qualität der Entwicklung steigen und gleichzeitig die Kosten sinken [Wien02]. Heute setzen vor allem Unternehmen aus der Automobil- und Maschinenbaubranche VR-Technologie produktiv ein. Der Anlagenbau nimmt mit neun Prozent nur einen geringen Anteil ein. Der Schiffbau und das Bauwesen sind nicht separat erfasst und fallen unter die zwölf Prozent sonstiger Industrien [Kloc03]. Klocke identifiziert

den größten Nutzeranteil bei einer Produktkomplexität von mehr als 250 Funktionseinheiten. Als größte Defizite nennt er neben den hohen Kosten die fehlende Standardisierung von VR.

Heinig stellt ein Verfahren vor, um die Montageplanung von Unikaten in VR durchzuführen [Hein15] und betrachtet damit komplexe Investitionsgüter. Der Ansatz bewertet verschiedene Montagestrategien. Ein Benutzer definiert verschiedene Pfade in VR, das System wertet diese aus und vergleicht sie untereinander. Alle Pfade erzeugt der Benutzer in der VR-Umgebung, eine Bewertung von extern importierten Montagepfaden sieht das System nicht vor.

Ebenso großes Potenzial bieten virtuelle Menschmodelle [Kloc03]. Bereits in einer frühen Phase können Konstrukteure und Planer eine ergonomische Gestaltung von Produkten gewährleisten oder eine Montageabsicherung durchführen [Lore08]. Insbesondere der Automobilbau hat die Entwicklung der Verfahren geprägt [Nede08]. Die Menschmodelle sind manuell oder durch das Erfassen der Benutzerbewegungen an die jeweilige Situation in der VR-Umgebung anpassbar. Für ein Automobil ist das ausreichend, da der Bewegungsradius der Benutzer die Größe des Produkts nicht übersteigt. Der Benutzer muss aufgrund der Produktgröße die Menschmodelle nicht weit bewegen. Für größere Produkte steigt der Aufwand für ergonomische Absicherungen schnell an [Mueh09]. Einige Ansätze reduzieren den Aufwand, indem sie vordefinierte Haltungen vorschlagen [Nede09], reichen für eine produktive Verwendung für Absicherungen komplexer Investitionsgüter jedoch nicht aus.

2.4.3 Erweiterte Realität

Die Erweiterte Realität ist die Integration von virtuellen Inhalten in die reale Welt (vgl. Abbildung 2-8). Die Arbeit verwendet dafür den englischen Begriff Augmented Reality (AR), da er sich in der Praxis durchgesetzt hat. Nach Azuma ist Augmented Reality durch drei Eigenschaften gekennzeichnet [Azum97]:

- Kombination aus virtuellen und realen Inhalten
- Interaktion in Echtzeit
- Registrierung im dreidimensionalen Raum (der realen Welt)

Es gibt viele unterschiedliche Formen von AR. In den letzten Jahren hat die Technologie einen Aufschwung durch die Verbreitung von Smartphones und Tablet-Computern erfahren. Die Einsatzzwecke der Technologie sind sehr unterschiedlich und reichen von virtuellen Reiseführern auf Smartphones über die Layoutplanung von Fabriken mit Tablet-Computern bis zur Unterstützung von Chirurgen in Operationssälen durch eine AR-Brille.

Ein AR-System besteht aus der Kombination von Hard- und Software. Die Hardware lässt sich in mehrere Kategorien aufteilen [vanK10]. Neben Smartphones und Tablets (hand held, video see through Geräte – VST) sind die gängigsten Vertreter AR-Brillen (head worn, optical see through – OST) und Projektoren, die virtuelle Inhalte in die Umgebung bringen, ohne den Blick des Betrachters zu berücksichtigen (spatial, spatially augmented reality – SAR). Mehrere namhafte Hersteller sind an der Entwicklung beteiligt. Für den industriellen Einsatz sieht Bauernhansl vor allem Tablet-Computer als besonders gut geeignet [Baue14].

Auf der Softwareseite ist jedes System ein Unikat. Hersteller wie bspw. Vuforia oder Fraunhofer (Instantreality) bieten ein Framework für die Softwareentwicklung an. Jedes Szenario und jeder Einsatzzweck benötigt eine eigene Entwicklung – eine Applikation. Diese besteht aus drei Komponenten: Daten, Interaktion und Tracking. Den Aufbau eines AR-Systems stellt Abbildung 2-9 dar.

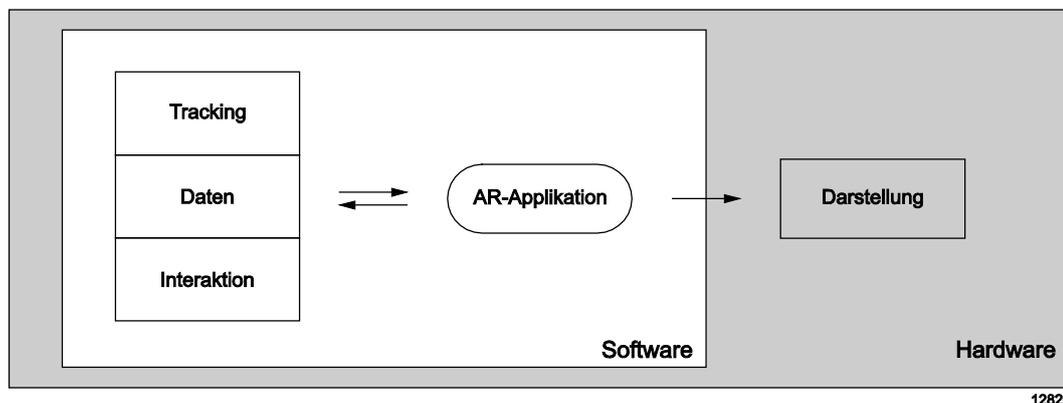


Abbildung 2-9: Struktur eines AR-Systems

Für die Orientierung in der realen Welt – dem Tracking – existieren viele unterschiedliche Ansätze mit verschiedenen Vor- und Nachteilen [Zhou08]. Zhou unterscheidet dabei nach sensorbasierten, videobasierten und hybriden Verfahren. Sensorbasierte Verfahren benutzen unterschiedliche im Gerät vorhandene Sensoren (Gyroskop, Kompass, GPS) zur Orientierung. Videobasierte Methoden verwenden das Kamerabild der Geräte und nutzen die daraus extrahierten Informationen, um sich zu orientieren. Da eine einzige Trackingmethode in der Regel nicht ausreichend ist, kombinieren hybride Verfahren unterschiedliche Ansätze. Für einen Einsatz in der komplexen Investitionsgüterindustrie eignen sich besonders videobasierte Verfahren (markerbasierte [Faer06], featurebasierte [Jian00], Kantentracking [Choi10]) sowie hybride Verfahren.

Darüber hinaus sind die Inhalte und die Interaktion mit den Inhalten wichtig für ein AR-System. Viele Forschergruppen beschäftigen sich mit dieser Thematik und entwickeln Lösungen für unterschiedliche Szenarien. Besonders die Serienfertigung

ist sehr stark untersucht (ARVIKA, ARVIDA, AVILUS, FLEXA). Neben dem Einsatz in der Produktion [Will06][Tegt06] und Logistik [Ste14] entwickeln Forscher und Unternehmen AR-Lösungen für den späteren Betrieb und den Service der Produkte [Essb14]. Diese Systeme sind auf häufig wiederkehrende Tätigkeiten an Produkten kompakter Größe ausgelegt. Für den Bereich der komplexen Güterindustrie stellt Bockholt einen Ansatz vor, um den Verlauf einzelner Rohre in der Fertigung von U-Booten zu visualisieren und zu planen [Bock11]. Von Lukas stellt in einer Studie zum Einsatz von AR in der Unikatfertigung potenzielle Einsatzszenarien dar, die von einer Assistenz zum Platzieren von Bauteilen über eine Logistikunterstützung bis hin zur Qualitätssicherung reichen [Luka09]. Neben dem industriellen Einsatz wenden viele Unternehmen die AR-Technologie als Marketing-Werkzeug an [Bule10][Kipp12].

Die vorhandenen Entwicklungen zeigen das Potenzial für einen Einsatz der AR-Technologie im industriellen Umfeld. Die Einsatzszenarien lassen sich dabei in vier Kategorien einordnen:

- Die Visualisierung von Informationen (Produkten, Schritten) direkt am Objekt
- Eine Kommunikationsplattform für mehrere Teilnehmer
- Qualitätssicherung
- Navigation von Mitarbeitern

Obwohl Einsatzpotenziale für den Einsatz der AR-Technologie in der Angebotserstellung gegeben sind, existiert momentan keine entsprechende Umsetzung.

2.4.4 Defizite vorhandener Ansätze

Es existieren unterschiedliche Ansätze, um die Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter zu unterstützen. Die verschiedenen Technologien zur Geometrieerfassung, sowie die Virtuelle und Erweiterte Realität haben das Potenzial, sowohl den Aufwand der Angebotserstellung zu reduzieren als auch die Qualität der Angebote zu erhöhen sind allerdings nicht dafür entwickelt. Für jeden dieser Ansätze gibt es Defizite:

Aufnahmetechnologien

Welcher Teil des Produkts muss erfasst werden?

- Der Aufnahmeumfang lässt sich momentan schwer ermitteln.
- Die benötigte Qualität der Aufnahme ist zurzeit nicht definiert und wird nach Erfahrungswerten gewählt.

Welche Technologie eignet sich zur Geometrieerfassung?

- Die Aufnahme mit nur einer Technologie deckt nicht alle vorhandenen Anforderungen an das Ergebnis und die Produktivität der Aufnahmen ab.
- Eine systematische Kategorisierung der zu erfassenden Umgebung ist nicht vorhanden.
- 3D-Kameras sind momentan für Aufnahmen großer Umgebungen nicht geeignet.

Wie können die Daten weiterverarbeitet werden?

- Die Modelle werden manuell nachkonstruiert, häufig detaillierter als für die Angebotsplanung erforderlich ist.
- Dadurch entsteht ein unnötig hoher Aufwand in der Nachkonstruktion.

Virtuelle Realität

- Unternehmen scheuen den Gebrauch aufgrund hoher Kosten und fehlender standardisierter Verfahren.
- Für einzelne Absicherungen in der Angebotsphase sind die vorhandenen Verfahren zu aufwändig.

Erweiterte Realität

- Jedes AR-System stellt ein abgeschlossenes System dar und ist nachträglich in der Regel nicht mehr erweiterbar.
- Für das Tracking und die Interaktion existieren unterschiedliche Ansätze. Die Kombination zwischen den beiden und der Inhaltsgenerierung ist sehr individuell und erfordert eine spezialisierte Lösung für jede einzelne Fragestellung.
- Die direkte Verwendung vorhandener, meist aus der Serienfertigung entstandener Methoden ist nicht möglich.

2.5 Fazit der Grundlagen

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen vorgestellt und eine Situationsanalyse durchgeführt. Unter komplexen Investitionsgütern versteht die Arbeit sehr große, materielle Produkte mit langen Lebensdauern und hohem Investitionsvolumen. Damit liegt der Fokus insbesondere auf der maritimen Industrie, dem Anlagenbau und dem Bauwesen.

Unterschiedliche Faktoren zwingen die Besitzer oder Betreiber der Produkte zu Umbauten. Untersuchungen der Prozesse zeigen einen Anteil des Planungsaufwands von bis zu 50% vom Gesamtaufwand. Das Angebot nimmt dabei einen erheblichen Teil ein. Nimmt der Kunde das Angebot nicht an, bleibt der investierte Aufwand beim Generalauftragnehmer. Der VDI stellt ein standardisiertes Verfahren für die Erstellung von Angeboten für Investitionsgüter zur Verfügung. Dieses weist allerdings andere Schwerpunkte auf und berücksichtigt nicht die spezifischen Anforderungen von Umbauprozessen. Es muss daher für die allgemeine Verwendung für Umbaumaßnahmen weiter detailliert und angepasst werden. Die Abhängigkeit zwischen dem investierten Aufwand und der Qualität des Angebots stellt die Generalauftragnehmer dabei vor große Herausforderungen. Daraus ergeben sich vier Hauptprobleme mit weiteren Teilproblemen.

Problem 1

Der existierende Prozess für die Angebotserstellung hat einen anderen Fokus und betrachtet nicht die spezifischen Randbedingungen von Umbauprozessen.

Problem 2

Angebote basieren häufig auf groben Abschätzungen und die Qualität ist dadurch momentan nicht ausreichend. Die identifizierten Teilprobleme sind:

- Geringe Qualität der Planung durch grobe Abschätzungen des Generalauftragnehmers
- Hohe Anpassungsquote der Angebote durch nachträgliche Änderungen des Kunden
- Maßnahmen sind für den Kunden nur schwer nachvollziehbar
- Koordination vieler Fremdvergaben für den eigentlichen Umbau erschwert die genaue Kalkulation aller Leistungen im Angebot
- Nacharbeit und zusätzliche Kosten durch fehlende Absicherungen
- Aufwände für Absicherungen sehr hoch
- Ein Vergleich verschiedener Prozessvarianten ist momentan nur schwer möglich

Problem 3

Geringe Auftragswahrscheinlichkeiten rechtfertigen den zum Teil sehr hohen Aufwand der Generalauftragnehmer für die Angebotserstellung nicht. Die identifizierten Teilprobleme sind:

- Eine Durchführung aller Prozessschritte der Angebotserstellung ist in der Regel sehr aufwendig und nicht zielführend

2 Situationsanalyse und Grundlagen

- Kaum geometrische Informationen über das umzubauende Produkt vorhanden
- Erfassung der Geometrie mit vorhandenen Technologien ist nicht zielgerichtet
- Ein teilweise unterschiedlicher Fokus des Kunden und des Generalauftragnehmers erschwert die Kommunikation über die geplanten Maßnahmen

Problem 4

Ansätze zur Verbesserung der Produktivität und der Qualität sind für einen Einsatz in der Angebotserstellung aufwändig und vom Prozess nicht berücksichtigt. Die identifizierten Teilprobleme sind:

- Hoher Aufwand für die Geometrieerfassung
 - unstrukturiertes Vorgehen bei der Geometrieerfassung
 - ungeeignete Technologie für die Problemstellung
 - nicht zielorientierte Rekonstruktion
- Virtuelle Absicherungen sind mit hohen Kosten verbunden

3 Phasenmodell der Angebotserstellung

Generalauftragnehmer benötigen einen systematischen Angebotserstellungsprozess für den Umbau komplexer Investitionsgüter. Dieses Kapitel stellt ein Modell für die Angebotserstellung vor. Abschnitt 3.1 leitet zunächst die Anforderungen an die Angebotserstellung aus den Defiziten ab. Abschnitt 3.2 entwickelt den Angebotserstellungsprozess und Abschnitt 3.3 beschreibt die Abhängigkeiten der einzelnen Prozessschritte. Abschließend identifiziert Abschnitt 3.4 Anforderungen an die unterstützenden Methoden und Werkzeuge.

3.1 Ziele und Anforderungen der Angebotserstellung

Dieser Abschnitt formuliert zunächst die Ziele an den gesamten Angebotserstellungsprozess (Abschnitt 3.1.1) und leitet anschließend die Anforderungen an den Prozess ab (Abschnitt 3.1.2).

3.1.1 Ziele

Ein wichtiges Ziel der Arbeit ist es, einen effizienten Angebotserstellungsprozess für Umbaumaßnahmen komplexer Investitionsgüter zu ermöglichen. Dieser Prozess soll universell einsetzbar sein und Umbaumaßnahmen unterschiedlicher Branchen abdecken. Die wichtigsten Branchen sind dabei die maritime Industrie, der Anlagenbau und das Bauwesen. Der Prozess soll an die etablierte VDI-Richtlinie 4504 angelehnt sein und diese erweitern und konkretisieren. Dies soll die Akzeptanz innerhalb der aufgeführten Branchen fördern. Der Prozess soll zudem an die jeweilige Aufgabe anpassbar sein und eine Bearbeitung durch mehrere Unternehmen, bspw. externe Dienstleister, erlauben.

Insgesamt ergeben sich drei explizite Teilziele bei der Entwicklung des Angebotserstellungsprozesses:

- die effiziente Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter zu gewährleisten,
- die Anwendbarkeit für verschiedene Branchen sicherzustellen und
- die Anpassung der Angebotserstellung an die unterschiedlichen Problemstellungen von Umbaumaßnahmen zu ermöglichen.

Um diese Ziele zu erreichen, sollen neben dem Prozess geeignete Methoden und Werkzeuge ausgewählt und in den Prozess integriert werden. Diese Werkzeuge helfen dem Generalauftragnehmer, den Prozess systematisch mit Hinblick auf die gestellten Ziele abzuarbeiten. Die Evaluation des Prozesses und aller Methoden und Werkzeuge in der Praxis stellt die Zielerreichung sicher.

3.1.2 Anforderungen an den Angebotserstellungsprozess

Die Anforderungen an den Angebotserstellungsprozess können in vier übergeordnete Punkte zusammengefasst werden:

1.) *Aufbau des Prozesses*: Unterschiedliche Rahmenbedingungen zwingen den Generalauftragnehmer, die Angebote und den Prozess der Angebotserstellung für jeden Auftrag anzupassen. Nur selten besteht der Prozess aus identischen Elementen. Um die Durchlaufzeit der Angebotserstellung möglichst gering zu halten und nur die benötigten Prozessschritte zu durchlaufen, muss der Aufbau modular sein und der Generalauftragnehmer einzelne Prozessschritte auslassen können. Dafür sind definierte Verknüpfungen zwischen den Prozessschritten erforderlich.

2.) *Integration des Kunden*: Der Generalauftragnehmer muss die Vorgaben des Kunden richtig verstehen und umsetzen. Dafür muss er ihn in den Prozess integrieren können. Dies vermeidet Fehlplanungen und sichert die Akzeptanz der gewählten Lösung.

3.) *Realistische Kostenabschätzung*: Das Angebot soll die Kosten realistisch abschätzen. Fehlplanungen führen in der Regel zur Nacharbeit und damit Mehrkosten für den Generalauftragnehmer. Um dies zu verhindern, sollen Absicherungen und Detailanalysen in den Prozess integriert werden und damit eine realistische Kostenabschätzung ermöglichen.

4.) *Verwendung gesammelter Erfahrungen*: Die Erfahrungen aus abgeschlossenen Projekten sollen nutzbar gemacht werden, um Fehler zu vermeiden und die Angebotserstellung zu verbessern.

3.2 Grundmodell

Der Angebotserstellungsprozess für Umbaumaßnahmen komplexer Investitionsgüter stellt eine Erweiterung der VDI-Richtlinie 4504 dar. Die Ausgangssituation zu Beginn von Umbaumaßnahmen ist unterschiedlich und für jedes Projekt liegen verschiedene Einflussgrößen vor:

- Objekt: das umzurüstende Produkt im aktuellen Zustand und mit weiteren Attributen (bspw. Größe, Leistung)
- Zielsetzung: das Ziel der Umbaumaßnahme, Anforderungen an die spätere Lösung (bspw. Schadstoffreduzierung, Absicherung gegen Erdbeben)
- Ressourcen des Kunden / Objekts: kapazitiv und terminlich
- Ressourcen des Generalauftragnehmers: kapazitiv und terminlich
- Weitere Einflussgrößen: vorgegebene Einschränkungen (bspw. der Umbaustandort)

Um die Einflussgrößen zu berücksichtigen und eine Planung des Prozesses zu ermöglichen, muss die Phase *Angebot erfassen und bewerten* des VDI-Vorgehens angepasst werden (Abbildung 3-1). Die spezifischen Anforderungen wirken sich auf die Erstellung des Angebots aus. Um diese zu berücksichtigen, wird die Phase *Angebot erstellen und präsentieren* vollständig neu gestaltet.

Abschnitt 3.2.1 entwickelt zunächst den Prozess für die Angebotserstellung. Abschnitt 3.2.2 ordnet ihn in bestehende Ansätze (VDI-Richtlinie) und Abschnitt 3.2.3 in den Gesamtumbauprozess ein.

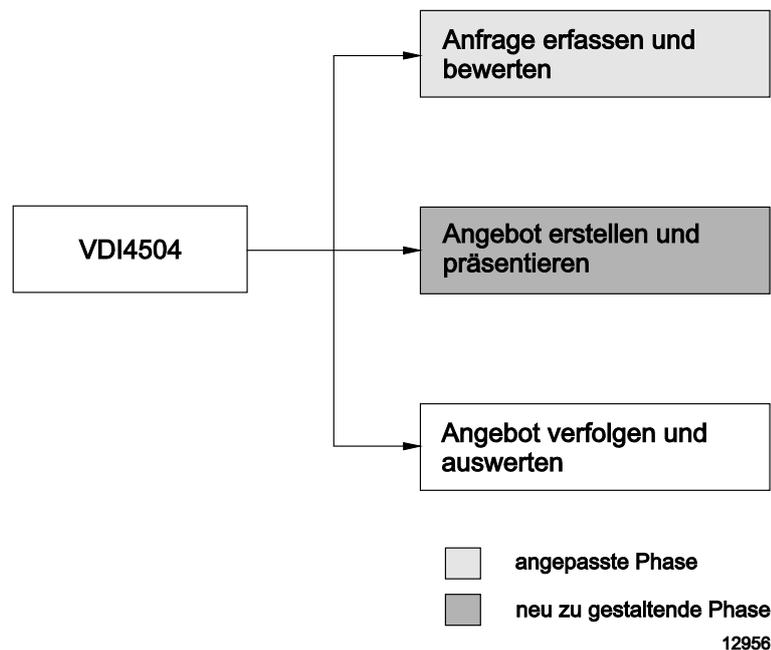


Abbildung 3-1: Erweiterung der VDI-Richtlinie 4504

3.2.1 Angebotserstellungsprozess

Ein systematisches, allgemeines und weit verbreitetes Vorgehen für die Problemlösung ist der Problemlösungszyklus nach Haberfellner: Zielsuche, Lösungssuche, Auswahl [Habe02]. Diese Vorgehensweise ist skalierbar und für die systematische Ausarbeitung von Angeboten geeignet. Der Kunde stößt den Prozess mit seinem Umbauwunsch an. Dieser stellt für den Generalauftragnehmer eine zu lösende Herausforderung dar. Im Zuge der Angebotserstellung löst er alle vorliegenden Probleme und erstellt letztlich das Angebot.

Für die vorliegende Problemstellung passt die Arbeit den Prozess an. Er umfasst die drei Phasen *Datenaufbereitung*, *Lösungsfindung* und *Ergebnisbereitstellung* (Abbildung 3-2). Die *Datenaufbereitung* erfüllt die Funktionen der Zielsuche nach

3 Phasenmodell der Angebotserstellung

Haberfellner und analysiert die Situation und formuliert das konkrete Ziel. Die *Lösungsfindung* durchläuft die Schritte Lösungssuche und Auswahl nach Haberfellner. Dabei untersucht sie unterschiedliche Lösungen, analysiert diese, bewertet sie und wählt abschließend die geeignete Lösung aus. Da der Generalauftragnehmer am Ende ein Angebot abgeben muss, stellt die *Ergebnisbereitstellung* den letzten Schritt des Prozesses dar. Sie entspricht der Ergebnisphase nach Haberfellner und ist das Resultat des Prozesses. Dieses kann nun für weitergehende Analysen oder die konkrete Realisierung benutzt werden.

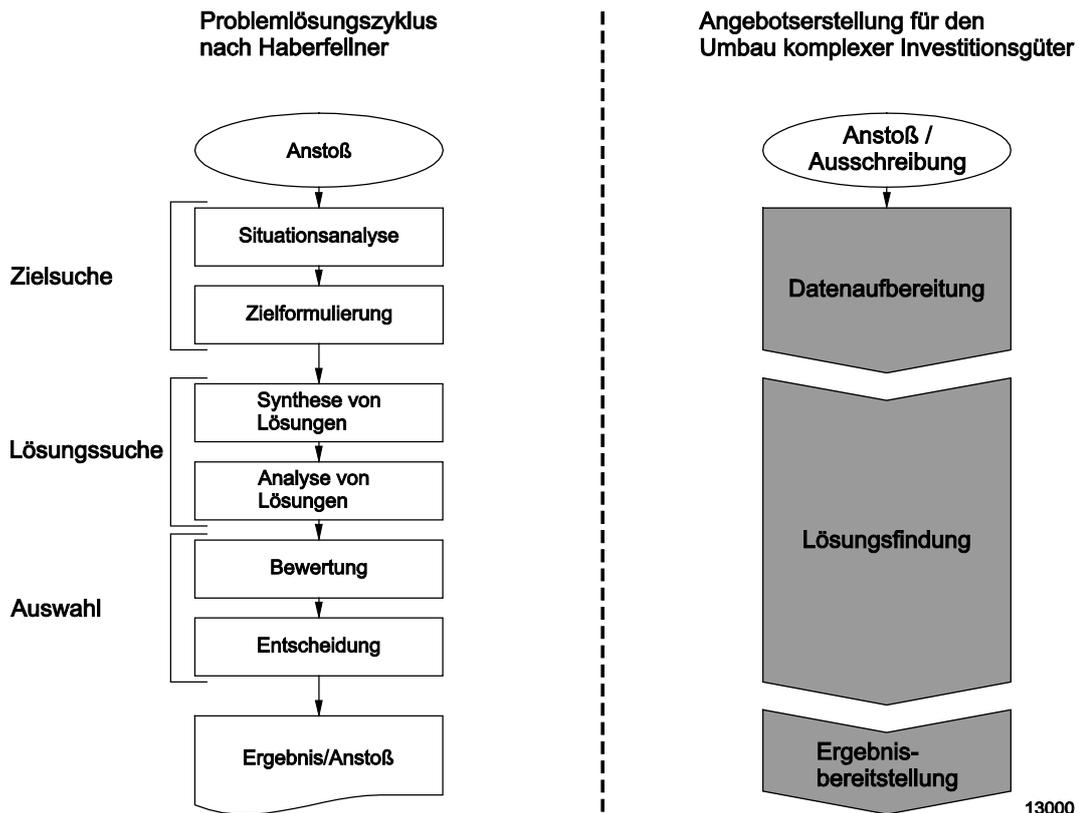


Abbildung 3-2: Ablaufmodell der Angebotserstellung

Die erste Phase, die *Datenaufbereitung*, dient dazu, die Situation zu erfassen und zu analysieren. Dafür nimmt der Generalauftragnehmer zunächst alle benötigten Daten, Geometrie- und Metadaten auf. Weiterhin bereitet er die Daten auf und schafft so eine Grundlage für die folgenden Schritte. Der Generalauftragnehmer schätzt auf dieser Grundlage die Realisierbarkeit des Projekts und die Aufwände ab und kommuniziert es dem Kunden. Dieser entscheidet somit in einem frühen Prozessstadium, ob dieses Projekt weitergeführt wird.

Als *Lösungsfindung* wurde analog zu Haberfellner die Lösungssuche, -auswahl und -ausarbeitung definiert. Zunächst erstellt und detailliert der Generalauftragnehmer

3 Phasenmodell der Angebotserstellung

verschiedene Lösungsalternativen. Neben der Konstruktion erfolgt eine betriebswirtschaftliche Betrachtung der Lösungsvarianten. Anschließend wählt er anhand zuvor festgelegter Kriterien die Lösung in Zusammenarbeit mit dem Kunden aus. Dies ist ein wichtiger Aspekt, da der Kunde letztlich über den Erfolg, also die Annahme oder Ablehnung des Angebots, entscheidet. Um eine hohe Qualität des Angebots zu erreichen, arbeitet der Generalauftragnehmer in der Regel bereits in der Angebotsphase die gewählte Alternative weiter aus. Am Ende der Phase liegen alle benötigten Kerndaten und Abschätzungen vor.

Als letzte Phase definiert die Arbeit die *Ergebnisbereitstellung*. Hier erstellt der Generalauftragnehmer neben der persönlichen Dokumentation das eigentliche Angebot und unterbreitet es dem Kunden.

Um die Vorgehensweise zu strukturieren und zu entkoppeln wurden die Phasen in mehrere Schritte unterteilt (Abbildung 3-3). Die eingangs festgelegten Einflussgrößen bestimmen die Ausprägung der Phasen und der Schritte. Die Angebotserstellung auf eine Kundenanfrage hat andere Schwerpunkte als eine Angebotserstellung aufgrund einer Ausschreibung. Der Prozess muss auf diese Einflussgrößen reagieren können und anpassbar sein.

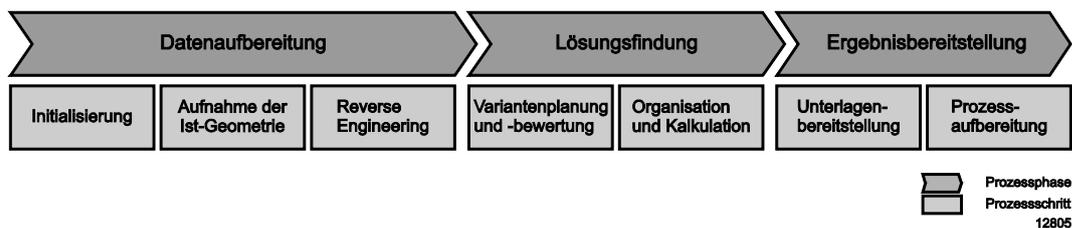


Abbildung 3-3: Phasenmodell mit Prozessschritten

Die *Initialisierung* dient dazu, alle vorhandenen und für das Projekt relevanten Daten zu sammeln. Der Generalauftragnehmer verifiziert auf dieser Basis die generelle Umsetzbarkeit der Umbaumaßnahmen. Dafür überprüft er die Kundenanforderungen und nimmt eine Grobabschätzung der Maßnahmen vor. Weiterhin legt er das Vorgehen für die weitere Angebotserstellung fest, indem er den Prozess konfiguriert. Die Initialisierung definiert damit den Prozess der Angebotserstellung und bestimmt die benötigten Prozessschritte. Zudem setzt die Initialisierung die Termine zu denen die einzelnen Schritte abgeschlossen sein müssen. Am Ende der Initialisierung sind die Ziele des Prozesses klar definiert und der Generalauftragnehmer kann mit der Bearbeitung beginnen.

Im zweiten Schritt, der *Aufnahme der Ist-Geometrie* nimmt der Generalauftragnehmer alle noch erforderlichen aber nicht vorhandenen Daten auf. Bei Umbauprozessen ist das im Wesentlichen die Geometrie des umzubauenden Produkts. Um eine

ausreichende Qualität zu gewährleisten, vermisst der Generalauftragnehmer oder ein externer Dienstleister die Umgebung vor Ort. Damit erweitert er die in der Initialisierung erhobene Datensammlung.

Wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, führen Aufnahmen von Geometrien zu Nachbearbeitungsprozessen. Diese berücksichtigt der Prozess im Schritt *Reverse Engineering*. Der Generalauftragnehmer oder ein externer Dienstleister bereitet die Daten für eine weitere Planung auf. Die Nachbearbeitung ist im Prozess von der Aufnahme getrennt, da sie von unterschiedlichen externen Partnern übernommen werden kann. Nach dem Reverse Engineering ist die Datengrundlage für die Konstruktion und Planung der Maßnahmen komplett und die Phase Datenaufbereitung damit abgeschlossen.

Die Phase Lösungsfindung ist gegliedert in die Schritte *Variantenplanung und -bewertung* sowie die *Organisation und Kalkulation* und damit in einen technischen und einen betriebswirtschaftlichen Teil. Die für beide Schritte zu durchlaufenden Aufgaben sind nach Haberfellner die Erzeugung von Lösungen, die Analyse von Lösungen, die Bewertung und die Entscheidung. Im Schritt Variantenplanung und -bewertung plant der Generalauftragnehmer zunächst die Komponenten in die vorhandene Struktur. Bei Umbauprojekten sind die Komponenten meist standardisiert, die konstruktive Leistung liegt deshalb in der Integration der Komponenten in das vorliegende Objekt und den Anschluss an bestehende Systeme. Der Generalauftragnehmer erstellt Varianten und bewertet diese. Am Ende steht die Lösung und eine Spezifikation ist erstellt. Da an Umbauprojekten typischerweise viele Unterauftragnehmer beteiligt sind, holt sich der Generalauftragnehmer Angebote für einzelne Tätigkeiten wie Logistik oder Einbau spezieller Systeme ein, bewertet diese und trifft Entscheidungen über die Vergabe. Zum Abschluss der Phase Lösungsfindung ist die Umbaumaßnahme geplant und die Lösung konstruktiv und monetär abgesichert.

Die letzte Phase teilt die Arbeit in die Schritte *Unterlagenbereitstellung* und die *Prozessaufbereitung* auf, um eine saubere Zusammenfassung des Angebots und die Dokumentation von gesammelten Erfahrungen zu gewährleisten. Der Generalauftragnehmer arbeitet die Ergebnisse aus der Lösungsfindungsphase auf und stimmt diese mit allen Beteiligten ab. Zusätzlich leitet er das Angebot ab und stellt es in geeigneter Form dar. Nach der Übergabe bereitet er alle vergangenen Schritte auf. Dies gewährleistet eine verbesserte Erfahrungsgrundlage für weitere Projekte.

Die Reihenfolge der Schritte ist durch die Problemlösungslogik vorgegeben. Bei der Durchführung ist die zeitliche Reihenfolge jedoch nicht starr. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Systemen, bspw. kann die Elektroinstallation unabhängig von der Schlosserei geplant werden. Der zweite Grund sind die Abstimmungen mit dem Kunden oder den Unterauftragnehmern. Die Schritte werden in diesem Fall mehrmals durchlaufen. Dies tritt besonders in der Lösungsfindungsphase auf.

Der modulare Aufbau ermöglicht es den Prozess an die vorliegenden Eingangsgrößen anzupassen. Stellt der Kunde bspw. ein ausreichendes CAD-Modell in der Initialisierung zur Verfügung oder reichen die vorhandenen Informationen für eine zuverlässige Planung aus, sind die Prozessschritte Aufnahme der Ist-Geometrie und das Reverse Engineering nicht notwendig und können ausgelassen werden.

Die Prozessschritte sind generisch gewählt und daher für unterschiedliche Branchen geeignet. Zusätzlich erlaubt es eine Anwendung des Prozesses bei verschiedenen Formen der Umbaumaßnahmen.

Ein wichtiger Aspekt der Angebotserstellung ist die Abstimmung mit dem Kunden. Sie bringt viele Vorteile und trägt letztlich zum Erfolg des Angebots bei. Eine Integration des Kunden an ausgewählten Stellen im Prozess ist damit sinnvoll. Die Arbeit identifizierte dafür drei geeignete Punkte:

- Initialisierung: Abstimmung der Grobplanung
- Variantenplanung und -bewertung: Vorstellung möglicher Lösungsalternativen und Bewertung aus Kundensicht
- Ergebnisbereitstellung: Präsentation der angebotenen Lösung

3.2.2 Einordnung in bestehende Ablaufmodelle zur Angebotserstellung

Der hier vorgestellte Prozess zur Angebotserstellung für Umbaumaßnahmen komplexer Investitionsgüter berücksichtigt die speziellen Rahmenbedingungen bereits vorhandener und betriebener Produkte. Abbildung 3-4 ordnet den Prozess in den bestehenden Ansatz nach VDI ein und erweitert diesen.

Der generelle Prozessablauf nach VDI bleibt bestehen. Zunächst schätzt der Generalauftragnehmer die Auftragswahrscheinlichkeit ab und trifft eine Entscheidung über die Weiterverfolgung des Angebots. Anschließend steht ihm der vorgestellte Angebotsprozess um ein Angebot systematisch zu erstellen zur Verfügung. In mehreren Schritten erstellt er das Angebot und übergibt es an den Kunden. Abschließend verfolgt er das Angebot bis zur Vertragsunterschrift.

Die vorgestellten sieben Prozessschritte gehören zu der Phase *Angebot erstellen und präsentieren* des VDI-Vorgehens. Eine Besonderheit liegt in dem Schritt Initialisierung vor. Bei Umbauprozessen sind normalerweise mehr Informationen notwendig als für die Erstellung eines Angebots über ein Neuprodukt. Ein Teil der Initialisierung erweitert daher die Phase *Anfrage erfassen und bewerten* der VDI-Richtlinie. Die Initialisierung ist in der Phase *Angebot erstellen und präsentieren* um diesen Anteil reduziert.

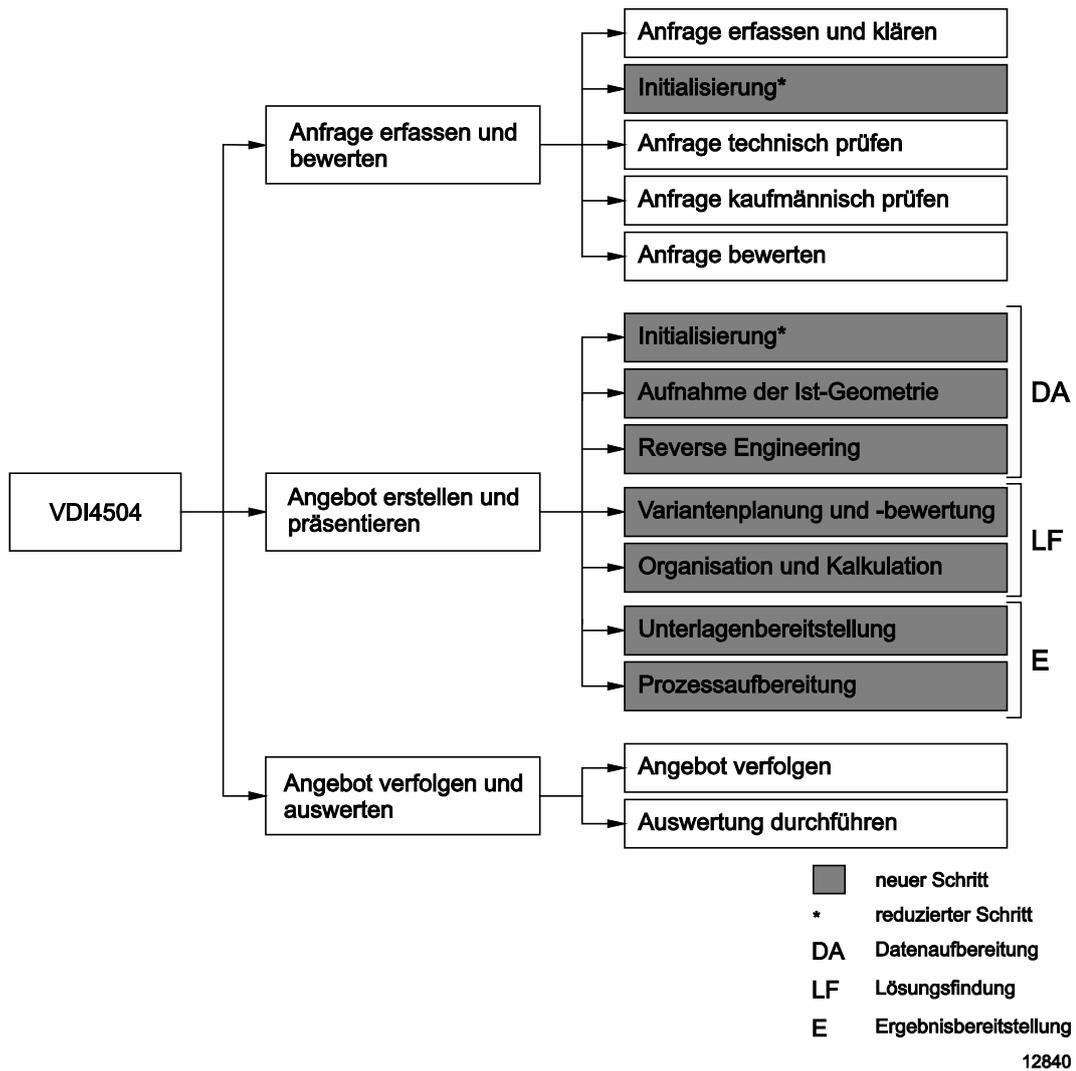


Abbildung 3-4: Erweiterte VDI-Richtlinie 4504

Der beschriebene Prozess ist besonders für Angebote auf Ausschreibungen relevant. Der Generalauftragnehmer entscheidet anonym über die Verfolgung der Ausschreibung. Nach Fertigstellung des Angebots verfolgt er dieses und wertet die Entscheidung des Kunden aus. Umbaumaßnahmen, die durch Anfragen des Kunden oder Werben des Generalauftragnehmers ausgelöst werden, überspringen häufig die Erfassungsphase, da der Entschluss ein Angebot vorzulegen, bereits vorliegt. In diesem Fall rückt der Anteil der Initialisierung in der Phase *Anfrage erfassen und bewerten* zurück in die Initialisierung der Phase *Angebot erstellen und präsentieren*.

3.2.3 Einordnung in den Gesamtumbauprozess

Der Generalauftragnehmer nutzt den beschriebenen Prozess, um ein Angebot zu erstellen. Der Detaillierungsgrad steigt während des Projekts kontinuierlich an. Der generische Ansatz des hier vorgestellten Angebotserstellungsprozesses erlaubt ein zyklisches Abarbeiten des Prozesses auf unterschiedlichen Detailstufen von der Vorplanung über das Angebot bis zur Detailplanung (Abbildung 3-5). Der Einsatzzeitpunkt definiert hier die Ausprägung und Aufwandsverteilung innerhalb der einzelnen Prozessschritte.

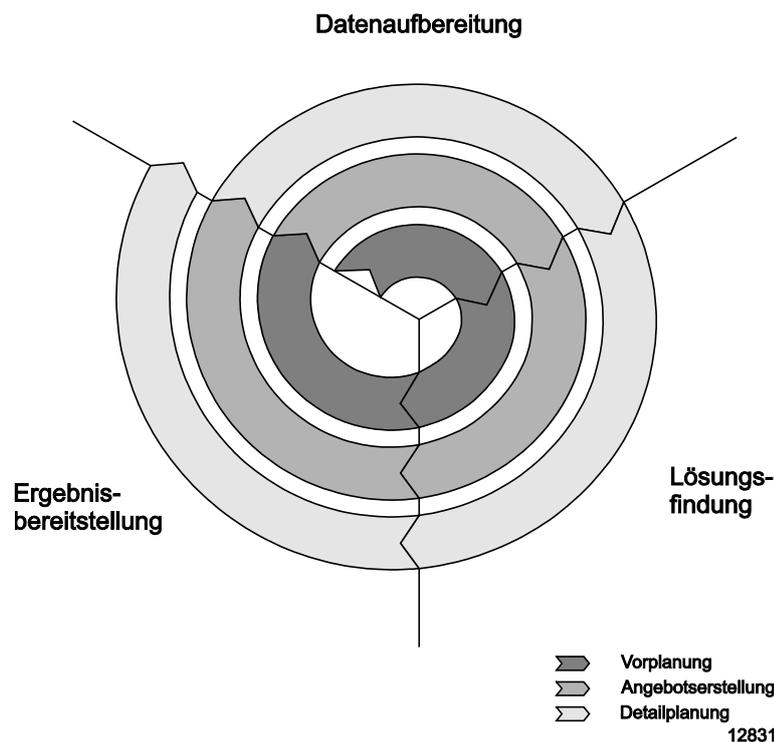


Abbildung 3-5: Prozesszyklus

In Umbauprojekten durchläuft der Generalauftragnehmer diesen Zyklus in der Regel dreimal: In der Vorplanung bzw. Anfrageerfassung und -bewertung, in der eigentlichen Angebotserstellung und anschließend in der Detailplanung nach dem Unterzeichnen des Angebots. Die Vorplanung ist dabei auf dem größten Level. Die Variantenplanung erfolgt an dieser Stelle normalerweise nicht in CAD, sondern mit einfacheren Werkzeugen. Die Aufnahme der Ist-Geometrie beschränkt sich oft auf manuelle Vermessungen oder Fotos. Ergebnis dieses ersten Zyklusses ist, vergleichbar zur VDI 4504, die Entscheidung über die Weiterführung des Angebots.

Im nächsten Zyklus erfolgt die eigentliche Angebotserstellung. An dieser Stelle durchläuft der Generalauftragnehmer den Prozess, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. Das Ergebnis ist das fertige Angebot. Nachdem der Kunde das Angebot angenommen hat, erfolgt die Detailplanung. Der Prozessaufbau ermöglicht eine Verwendung des Vorgehens für die anschließende Detailplanung mit jeweils anderen Detaillierungen der Prozessschritte.

3.3 Abhängigkeiten

Nach der Herleitung des gesamten Angebotserstellungsprozesses definiert dieser Abschnitt die Abhängigkeiten innerhalb des Prozesses. Logische Abhängigkeiten beeinflussen die Auswahl der relevanten Schritte (3.3.1), prozessbedingte bestimmen die Reihenfolge bzw. den Pfad der Schritte (3.3.2) und die lösungsspezifischen definieren den Aufwand der Schritte (3.3.3). Die zeitlichen Abhängigkeiten terminieren den Prozess (3.3.4).

3.3.1 Logische Abhängigkeiten

Die logischen Abhängigkeiten verknüpfen Prozessschritte und Prozessphasen miteinander und steuern so den Gesamtablauf. Sie stellen die oberste Hierarchieebene über den prozessbedingten und zeitlichen Abhängigkeiten dar.

Diese logischen Zusammenhänge sind generell gegeben und beeinflussen maßgeblich die Konfiguration der Angebotserstellung. Die anfangs aufgenommenen Eingangsgrößen konfigurieren den Prozess anhand dieser Zusammenhänge. Diese Vorgehensweise erlaubt einen Einsatz des entwickelten Ablaufs in der kompletten Angebotserstellung und in einzelnen Teilaufgaben. Vergibt der Generalauftragnehmer einzelne Aufgaben des Prozesses wie die Aufnahme der Ist-Geometrie oder die Erstellung des Planungsmodells an externe Dienstleister, dann finden einzelne Schritte nicht mehr unternehmensintern statt. In dem Beispiel arbeitet der externe Unterauftragnehmer, in diesem Fall ein Vermessungsdienstleister, mit dem zuvor dargestellten Prozess und liefert die geforderten Ergebnisse. Der Unterschied liegt in der Ausprägung der einzelnen Prozessschritte. Der Dienstleister durchläuft nur die drei Prozessschritte Initialisierung, Aufnahme der Ist-Geometrie und das Reverse Engineering, während sich der Prozess des Generalauftragnehmers um diese Schritte reduziert. Um eine solche Modularisierung zu ermöglichen und gleichzeitig standardisierte Prozessschritte zu erhalten, definiert die Arbeit Inputs und Outputs der einzelnen Teilschritte des Prozesses.

Die Initialisierung stellt in jedem Prozess ein festes Element dar und jeder Teilnehmer, Generalauftragnehmer oder externer Dienstleister, durchläuft sie in seinem Prozess. Vergibt der Generalauftragnehmer einzelne Schritte, so durchläuft der Unterauftragnehmer zunächst eine Initialisierung und weiterhin die ausgelagerten

Schritte. Dieser Mehraufwand entsteht bei jeder Fremdvergabe und muss vom Generalauftragnehmer berücksichtigt werden. Obwohl der Generalauftragnehmer Teile des Prozesses auslagert, bleiben die Inputs und Outputs in seinem Prozess bestehen. Zum einen dienen sie als kontrollierbare Zwischenergebnisse und zum anderen stellen sie Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Schritten dar.

3.3.2 Prozessbedingte Abhängigkeiten

Die prozessbedingten Abhängigkeiten sind den logischen Abhängigkeiten hierarchisch untergeordnet und definieren die Reihenfolge der einzelnen Schritte untereinander. Sie sind durch die jeweiligen Inputs und Outputs der Schritte gegeben.

Die Inputs und Outputs hängen vom Auftragsgegenstand und der Branche ab. Deshalb wurden sie in zwei Kategorien unterteilt: notwendige und ergänzende. Jedes Unternehmen muss diese Kategorisierung einmal für alle Schritte vornehmen und damit die festen Größen der Projekte festlegen. Die ergänzenden Outputs bestimmt der Koordinator basierend auf den jeweiligen Eingangsgrößen bei der Initialisierung für jedes Projekt neu. Er legt diese für die Dauer des Projekts als erforderliche Größe fest.

Die Kombination von grundlegend notwendigen Ausgangsgrößen und den jeweils festgelegten Prozessgrößen steuert die Prozessschritte. Abbildung 3-6 stellt die Abhängigkeiten beispielhaft für den Prozessschritt Variantenplanung und -bewertung dar. Der Generalauftragnehmer hat das 3D-Modell als einen ergänzenden Output definiert. Die Ausarbeitung des 3D-Modells ist in diesem Projekt somit nicht notwendig (kein Muss-Output). In diesem Fall kann der Prozessschritt Organisation und Kalkulation also beginnen, sobald die Stücklisten und Zeichnungen vorliegen.

Input	Prozessschritt	Output	Muss-Output
...
Pläne	Variantenplanung & -bewertung	Stücklisten	x
Planungsmodell		3D-Modell	
Pflichtenheft		Zeichnungen	x
...		...	
Stücklisten	Organisation & Kalkulation	Angebote der Unterauftragnehmer	x
3D-Modell		Kapazitäts- und Bedarfsplan	
Zeichnungen		Kalkulation	x
...		...	
...

12959

Abbildung 3-6: Prozessbedingte Abhängigkeiten

Ist eine Ausgangsgröße als notwendig eingestuft, muss sie vorliegen, um den nächsten Schritt zu beginnen. Die Quelle der Ergebnisse ist für die Definition der prozessbedingten Abhängigkeiten prinzipiell unerheblich. Vergibt der Generalauftragnehmer bspw. Aufgaben an externe Unterauftragnehmer, so fließen die Ergebnisse direkt in den nächsten Schritt.

3.3.3 Lösungsspezifische Abhängigkeiten

Verschiedene lösungsspezifische Kriterien definieren den zur Erzeugung der einzelnen Outputs benötigten Aufwand. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser entweder fix oder variabel sein kann. Outputs mit einem weitgehend fixen Aufwand kann der Generalauftragnehmer für die Planung der Angebotserstellung aus alten Projekten direkt übernehmen. Ein Beispiel dafür wäre das Ableiten der Zeichnungen (Abbildung 3-7). Outputs mit einem variablen Aufwand muss der Generalauftragnehmer errechnen, bspw. steigt der Aufwand, ein 3D-Modell zu erzeugen, mit der Anzahl der in die Umgebung zu integrierenden Komponenten und der ausgewählten Technologie an. Die Basiswerte übernimmt der Generalauftragnehmer im Idealfall ebenfalls aus alten Projekten.

Prozessschritt	Output	Aufwand	Einflussfaktor
...
Variantenplanung & -bewertung	Stücklisten	fix	
	3D-Modell	variabel	Technologie, Anzahl, Umgebung
	Zeichnungen	fix	

Organisation & Kalkulation	Angebote der Unterauftragnehmer	fix	
	Kapazitäts- und Bedarfsplan	variabel	Technologie, Anzahl
	Kalkulation	fix	

...

13001

Abbildung 3-7: Lösungsspezifische Abhängigkeiten

Die Arbeit identifiziert drei Faktoren als bestimmende Größen für den variablen Aufwand:

- Technologie
- Anzahl
- Umgebung

Die Technologie ist der erste Faktor. Verschiedene Technologien sind durch unterschiedliche Rahmenbedingungen, wie Größe, Anzahl der Einzelbauteile oder Ge-

wicht gekennzeichnet. Dies wirkt sich auf den Aufwand aus. Der zweite Faktor berücksichtigt als wesentliche Einflussgröße die Anzahl der Hauptkomponenten. Sind bspw. neue Filtersysteme in einer Anlage nachzurüsten, definiert dieser Faktor die Anzahl der betroffenen Absauganlagen. Der dritte Faktor beschreibt die Komplexität der Umgebung. Findet der Umbau auf einer offen zugänglichen Fläche oder einem verbauten Raum statt, so wirkt sich das auf den Aufwand aus.

Der Einfluss der drei Faktoren ist nicht zwingend linear und der Generalauftragnehmer muss diesen aus vorangegangenen Projekten ableiten. Die Auswirkungen der Faktoren auf die einzelnen Outputs sind jedoch übertragbar.

3.3.4 Zeitliche Abhängigkeiten

Der Prozessaufbau ermöglicht eine inputgesteuerte Abarbeitung. Der nächste Schritt kann beginnen, sobald die benötigten Inputs vorliegen und muss nicht auf die Fertigstellung des gesamten Schritts warten. Dies ist besonders in der Variantenplanung und -bewertung und der Organisation und Kalkulation entscheidend, da diese Schritte an dieser Stelle häufig parallel verlaufen. Die Planung der Angebotserstellung muss diesen Effekt berücksichtigen.

Häufig gibt der Kunde bei Umbaumaßnahmen komplexer Investitionsgüter dem Generalauftragnehmer einen Termin für das Angebot vor. Bei öffentlichen Ausschreibungen ist es die Einreichungsfrist. Diese Vorgaben und die inputgesteuerte Abarbeitung muss der Generalauftragnehmer bei der Erzeugung eines Projektablaufplans berücksichtigen. Für die Terminierung stehen ihm mehrere Arten zur Verfügung [Kust11][Kerz03]:

- Vorwärtsterminierung: Terminierung vom Projektstart bis zum Schluss
- Rückwärtsterminierung: Terminierung ausgehend vom vorgegebenen Endtermin
- Netzplan mit Pufferzeiten: Verteilung von Pufferzeiten zwischen einzelnen Prozessschritten
- Netzplan ohne Pufferzeiten: Terminierung mit der Netzplantechnik ohne Pufferzeiten, d.h. der früheste Endtermin wird eingeplant

Die verschiedenen Terminierungsstrategien sind für die Prozessplanung entscheidend. Abbildung 3-8 stellt die Terminierung mit Pufferzeiten in einem Gantt-Diagramm exemplarisch dar. Die Arbeit berücksichtigt die verschiedenen Arten und vervollständigt damit den konfigurierten Prozessplan.

3 Phasenmodell der Angebotserstellung

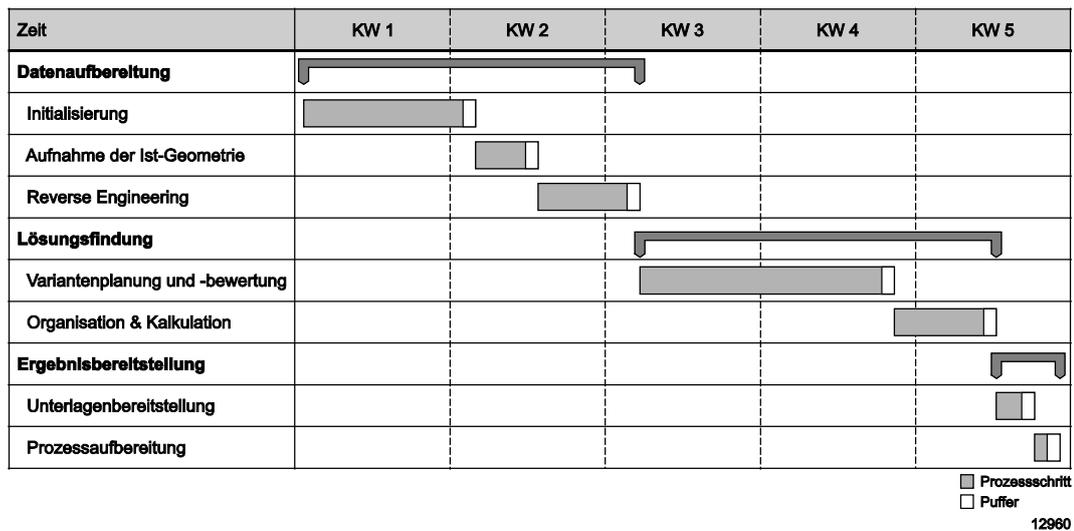


Abbildung 3-8: Terminierung mit Pufferzeiten

3.4 Anforderungen an die Methoden und Werkzeuge

Um die Ziele der Angebotserstellung zu erreichen, entwickelt die Arbeit Methoden, die den Prozess zur Angebotserstellung systematisch unterstützen. Für die Umsetzung der Methoden implementiert die Arbeit Werkzeuge. Dadurch ergibt sich eine Hierarchie von Angebotserstellung, Methoden und Werkzeugen (Abbildung 3-9). Die Methoden sind systematische Vorgehensweisen und unterstützen den Prozess in der Ausführung. Die Werkzeuge sind klassische Hilfsmittel und stellen Funktionen bereit, um die Ziele der Methoden zu erreichen.

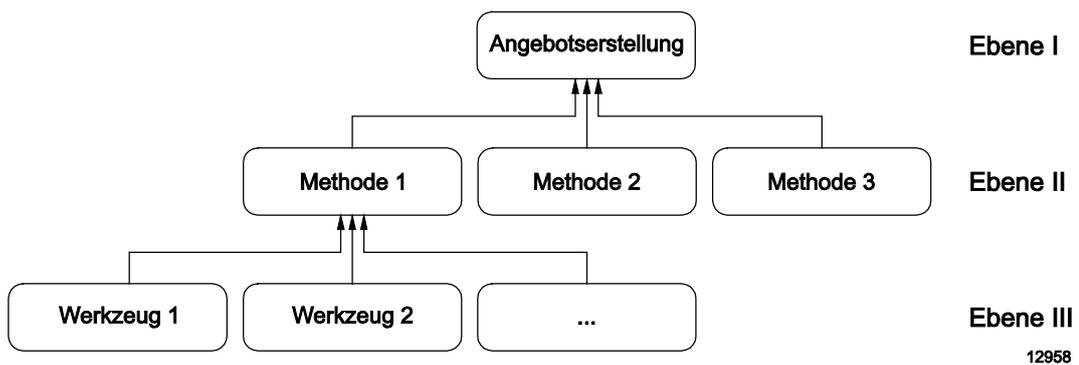


Abbildung 3-9: Hierarchische Einordnung der Angebotserstellung, der Methoden und der Werkzeuge

Dieser Abschnitt leitet zunächst die Anforderungen an das Vorgehen innerhalb einzelner Schritte der Angebotserstellung und anschließend an die Methoden und die Werkzeuge her. Die Anforderungen sind nach den Phasen der Angebotserstellung

gegliedert: Datenaufbereitung (Abschnitt 3.4.1), Lösungsfindung (Abschnitt 3.4.2) und Ergebnisbereitstellung (Abschnitt 3.4.3).

3.4.1 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung hat das Ziel, alle benötigten Informationen zu sammeln und eine ausreichende Planungsgrundlage für die anschließende Lösungsfindung zu schaffen. Die drei Schritte der Datenaufbereitung verfolgen die einzelnen Teilziele:

- Initialisierung: Sammeln aller notwendigen Informationen und Vorbereiten des Prozesses
- Aufnahme der Ist-Geometrie: Erfassen aller notwendigen geometrischen Informationen
- Reverse Engineering: Bereitstellen eines Planungsmodells

Initialisierung

Die Initialisierung schafft eine Informationsgrundlage und bereitet den Prozess vor. Dafür muss sie zunächst systematisch alle relevanten und beim Kunden vorhandenen Informationen aufnehmen. Diese bestehen aus:

- allgemeinen Informationen (bspw. Kundendaten),
- technischen Informationen (bspw. Leistungsdaten, technische Pläne),
- verschiedenen Rahmenbedingungen (bspw. Umbauzeitpunkt) und
- speziellen Wünschen des Kunden (bspw. Zugänglichkeit).

In Umbauprojekten ist es eine besondere Herausforderung für den Generalauftragnehmer, die Historie und das typische Einsatzfeld der Objekte vollständig zu erfassen. Häufig sind zwar alle für die Initialisierung benötigten Informationen beim Kunden vorhanden, diese werden in der Praxis jedoch häufig nicht richtig übermittelt. Dies liegt einerseits daran, dass der Kunde nicht weiß, welche Daten der Generalauftragnehmer benötigt und in welchem Detaillierungsgrad. Auf der anderen Seite kann der Generalauftragnehmer nur schwer abschätzen, welche Informationen beim Kunden vorliegen. Um die Vollständigkeit der Daten zu gewährleisten und unterschiedliche Projekte vergleichen zu können, sollte die Aufnahme deshalb standardisiert und systematisch erfolgen.

Auf dieser Informationsgrundlage muss der Generalauftragnehmer die technologischen und betriebswirtschaftlichen Aufwände für die angestrebten Umbaumaßnahmen grob abschätzen und entscheiden, ob er ein Angebot erstellen möchte. Die Entscheidung basiert häufig auf der Kommunikation mit dem Kunden. Eine Kommunikationsgrundlage sollte alle Inhalte der Umbaumaßnahmen für den Kunden

verständlich darstellen. Dies beinhaltet die vorgeschlagene Lösung und ihre Auswirkungen auf das vorhandene Objekt. Der Generalauftragnehmer muss diese Kommunikationsgrundlage direkt und ohne Vorbereitungsaufwand einsetzen können.

Anschließend muss der Generalauftragnehmer die Angebotserstellung vorbereiten. Dafür muss er den Prozess entsprechend den aufgenommenen Daten konfigurieren. Dabei entscheidet er, welche Aufgaben er an externe Unterauftragnehmer vergibt, welche Prozessschritte oder Outputs für die vorliegende Umbaumaßnahme nicht benötigt werden und passt so den Prozess an. Anschließend ist eine Terminierung der einzelnen Schritte erforderlich, um die Angebotserstellung in der Durchführung verfolgen zu können – ein Projektcontrolling vorzunehmen. Eine optionale Schnittstelle für die Verwendung des angepassten Prozesses in gängigen Werkzeugen (bspw. MS Excel) vervollständigt die Vorbereitung.

Aufnahme der Ist-Geometrie

Die in der Initialisierung aufgenommenen Daten beschränken sich häufig auf Metadaten, da Geometrieinformationen über das Produkt oder die Umgebung beim Kunden normalerweise nicht vorliegen. Die Aufnahme der Ist-Geometrie muss alle fehlenden Geometrieinformationen erfassen. Dafür muss der Generalauftragnehmer diese Aufnahme zunächst vorbereiten. Er muss bestimmen, welcher Teil des Produkts erfasst werden muss und welche Technologie man zur Geometrieerfassung einsetzt (Abschnitt 2.4.1). Da eine Aufnahme des gesamten Objekts wegen der Größe normalerweise nicht zielführend ist, muss er den Betrachtungsbereich einschränken können. Der Bereich sollte feste Kriterien für die Aufnahmen beinhalten. Auf Basis der Anforderungen an den Bereich und an die verschiedenen Aufnahmetechnologien sollte der Generalauftragnehmer die zu verwendende Aufnahmetechnologie und -strategie festlegen können.

Die eigentliche Geometrieerfassung muss den vorher definierten Rahmenbedingungen gerecht werden. Der Generalauftragnehmer muss den relevanten Bereich mit dem vorgegebenen Aufwand erfassen können. Die Aufnahme von komplexen Investitionsgütern bedeutet die Aufnahme einer gesamten Umgebung mit separaten Teilen innerhalb dieser Umgebung. Die verwendeten Aufnahmeverfahren müssen solche Umgebungen abdecken können. Um sie an die vorliegenden Rahmenbedingungen anzupassen, sollte die Aufnahmequalität variabel sein. Die Qualität beinhaltet zwei wichtige Aspekte:

- Genauigkeit der Aufnahmen
- Vollständigkeit der Aufnahmen

Die Genauigkeit gibt der Kunde vor oder sie ergibt sich aus den Rahmenbedingungen des Projekts. Eine komplexe Umgebung mit vielen Bauteilen vollständig aufzunehmen erfordert sehr viele Aufnahmen. Die Anzahl der Aufnahmen wirkt sich direkt auf den Aufwand aus. Daher muss die Vollständigkeit der Aufnahmen ein skalierbarer Faktor sein und von der Definition der kategorisierten Bereiche abgedeckt werden.

Ausfallzeiten komplexer Investitionsgüter sind häufig sehr teuer. Die Geometrie sollte daher möglichst während des Betriebs aufgenommen werden können.

Reverse Engineering

Das Ziel des Reverse Engineering ist es, aus den aufgenommenen Daten (Initialisierung und Aufnahme der Ist-Geometrie) ein Planungsmodell bereitzustellen. Um eine anschließende Bearbeitung des Angebots zu gewährleisten, muss das Planungsmodell:

- alle relevanten Umgebungen und Objekte in der geforderten Qualität abbilden,
- die Geometrie- mit den Metainformationen verknüpfen und
- in der anschließend verwendeten Planungssoftware (normalerweise CAD) bearbeitbar sein.

Die geforderte Qualität und der erforderliche Umfang bestimmen den Aufwand des Reverse Engineering. Der Generalauftragnehmer muss beides sorgfältig definieren. Um die Vollständigkeit zu gewährleisten, sollte diese Definition nach einem standardisierten Verfahren erfolgen.

3.4.2 Lösungsfindung

In der Lösungsfindung hat der Generalauftragnehmer das Ziel, eine geeignete Lösung zu erarbeiten. Die zwei Schritte der Lösungsfindung verfolgen die einzelnen Teilziele:

- Variantenplanung und -bewertung: Erarbeiten der technischen Lösung
- Organisation und Kalkulation: Erarbeiten der wirtschaftlichen Lösung

Variantenplanung und -bewertung

Die Variantenplanung und -bewertung erarbeitet zunächst unterschiedliche technische Lösungsvarianten der geplanten Umbaumaßnahmen und bewertet sie. Aus dieser Bewertung wählt der Schritt die geeignete Lösung aus. Darauf bauen anschlie-

ßend das Angebot und später die Detailplanung auf. Das Ergebnis der Variantenplanung und -bewertung muss alle Rahmenbedingungen berücksichtigen und eine Lösung bereitstellen. Der Generalauftragnehmer muss diese Lösung nach Annahme des Angebots weiter detaillieren können, ohne auf unbedachte Herausforderungen zu stoßen. Die Lösung muss dafür:

- den Einbauort aller Komponenten festlegen,
- die Demontagepfade alter Komponenten und
- die Montagepfade der neuen Komponenten berücksichtigen,
- klare Arbeitsaufgaben beinhalten,
- mit dem Kunden abgestimmt und
- für die Werker umsetzbar sein.

Für den Einbauort und den Demontage- und Montagepfad ergeben sich normalerweise sehr viele Möglichkeiten. Der Generalauftragnehmer muss unterschiedliche Varianten planen und anschließend bewerten können. Die Bewertungskriterien setzen sich aus

- den Eingangsgrößen,
- den Wünschen des Kunden und
- der Realisierbarkeit der Lösung

zusammen. Die Eingangsgrößen sind die vorgegebenen Rahmenbedingungen. Die Wünsche des Kunden muss der Generalauftragnehmer in die verschiedenen Varianten einfließen lassen. Um Kommunikations- und Verständnisschwierigkeiten und damit Nacharbeit zu vermeiden, sollte er die Lösungsvarianten dem Kunden präsentieren und mit ihm gemeinsam darüber diskutieren können. Dies sollte auf einer für den Kunden verständlichen Plattform geschehen.

Das dritte Kriterium ist die Realisierbarkeit der Lösung. Die Monteure müssen die Lösung umsetzen können. Bereits in der Angebotserstellung muss der Generalauftragnehmer die Demontage- und Montageschritte absichern. An dieser Stelle ist eine grobe Absicherung der generellen Durchführbarkeit der Tätigkeiten ausreichend, Detailanalysen sind wegen des hohen Aufwands meist nicht mehr Teil der Angebotserstellung. Dafür muss der Generalauftragnehmer kritische Tätigkeiten aufwandsarm identifizieren und bewerten können. Weiterhin benötigt er ein Absicherungsverfahren, um die kritischen Arbeitsaufgaben näher zu untersuchen. Um den Aufwand zu begrenzen, sollte sich die Untersuchung auf so wenige Arbeitsaufgaben wie möglich, allerdings so viele wie nötig beschränken.

Für die gefundene Lösung muss der Generalauftragnehmer die Komponenten spezifizieren und die Aufgaben für die Umsetzung klar definieren. Darauf basiert die betriebswirtschaftliche Bewertung der Lösung.

Organisation und Kalkulation

Die Organisation und Kalkulation bewertet die wirtschaftlichen Aspekte der Lösung. Die beiden wichtigsten Bestandteile sind:

- das Personal und
- die Komponenten.

Der Generalauftragnehmer muss für die Personalkosten sowohl die eigenen Kapazitäten als auch die Leistungen externer Unterauftragnehmer berücksichtigen. Weiterhin ist für die Erstellung des Angebots die Kenntnis über die Komponentenkosten notwendig. Beide Bestandteile muss der Generalauftragnehmer im Angebot berücksichtigen.

3.4.3 Ergebnisbereitstellung

Die Phase Ergebnisbereitstellung hat das Ziel, das Angebot zu finalisieren und dem Kunden zur Verfügung zu stellen. Außerdem sollen die Erfahrungen dokumentiert und für weitere Projekte bereitgestellt werden (vgl. VDI-Richtlinie 4504). Die Teilziele der beiden Schritte der Ergebnisbereitstellung sind:

- Unterlagenbereitstellung: Übergabe des Angebots an den Kunden
- Prozessaufbereitung: Dokumentation und Erfahrungsgewinn aus dem Prozess

Unterlagenbereitstellung

In der Unterlagenbereitstellung fertigt der Generalauftragnehmer das finale Angebot an. Zunächst muss er systematisch alle vorher erarbeiteten Schritte intern zu einem Angebot zusammenführen. Daraus muss er anschließend das Angebot für den Kunden ableiten. Ein wichtiger Faktor ist die formelle Bereitstellung des Angebots. Der Generalauftragnehmer sollte dies nach einem standardisierten Verfahren erstellen. Darüber hinaus können zusätzliche optionale Leistungen des Generalauftragnehmers das Verständnis und die Bereitschaft des Kunden fördern, diese Lösung umzusetzen. Zu diesen Leistungen zählen:

- die Transparenz der Maßnahmen und
- die Nachvollziehbarkeit der Maßnahmen und der Annahmen.

Zu diesem Zeitpunkt ist die Lösung technisch und betriebswirtschaftlich aufbereitet. Mögliche auftretende Herausforderungen während der späteren Umbauphase sind an dieser Stelle berücksichtigt. Der Generalauftragnehmer sollte die Maßnahmen über eine geeignete Plattform dem Kunden darstellen können.

Prozessaufbereitung

Im letzten Schritt der Angebotserstellung, nach Abgabe des Angebots, muss der Generalauftragnehmer die Erfahrungen aus dem Prozess analysieren und die Erkenntnisse weiterverarbeiten können. Dafür benötigt der Generalauftragnehmer standardisierte Kennzahlen, um den Verlauf des Prozesses aufnehmen und analysieren zu können. Diese Kennzahlen sollten sich neben dem Prozessfortschritt auf die Produktivität als eine wesentliche Herausforderung der Angebotserstellung (Abschnitt 2.5) beziehen.

4 Datenaufbereitung

Das Ziel der Datenaufbereitung ist es, alle benötigten Informationen über das Projekt sowie Geometrie- und Metainformationen zu sammeln und eine ausreichende Planungsgrundlage für die nachfolgenden Schritte bereitzustellen. Zunächst erfolgt die Aufnahme aller bereits vorhandenen Informationen und eine Planung des Vorgehens in der Initialisierung (Abschnitt 4.1). Anschließend wird die vorhandene Ist-Geometrie aufgenommen (Abschnitt 4.2). Abschnitt 4.3 beschreibt die Erstellung des eigentlichen Planungsmodells.

Alle Abschnitte definieren zunächst das Vorgehenskonzept in einzelnen Schritten sowie deren Eingangs- und Ausgangsgrößen. Anschließend leitet die Arbeit wesentliche Methoden und Werkzeuge her, die das Konzept systematisch dabei unterstützen, die definierten Anforderungen zu erfüllen.

4.1 Initialisierung

4.1.1 Informationsgrundlage

Das Ziel der Initialisierung ist es, den Projektinhalt zu erfassen und die Rahmenbedingungen zusammenzutragen. Diese Datengrundlage beeinflusst in hohem Maße den restlichen Projektplan und definiert die Aufwände der einzelnen Schritte. Die Initialisierung besteht aus drei Prozessschritten (Abbildung 4-1):

- Aufnahme der Metadaten
- Grobprojektierung
- Planung des Vorgehens

Aufnahme der Metadaten

Der erste Prozessschritt ist die Aufnahme der Einflussgrößen und der beim Kunden vorliegenden Informationen zum Objekt – der Metadaten. Die Aufgabe des Schrittes ist es, die Datengrundlage aufzubauen und damit die Eingangsgrößen des Gesamtprojekts bereitzustellen. Um alle Informationen zu erfassen, benötigt der Generalauftragnehmer ein systematisches Verfahren. Ein dafür geeignetes Werkzeug ist der Fragebogen. Der Kunde füllt ihn aus und gibt alle benötigten Informationen an den Generalauftragnehmer weiter. Dies beinhaltet neben allgemeinen Angaben, Informationen zum Ist-Zustand des Objekts (Pläne, Zeichnungen) und Anforderungen an die Umbaumaßnahmen, wie den Zeitraum oder Vorgaben, welches Unternehmen einzelne Arbeiten durchführen soll. Der Fragebogen dient als Leitfaden, welche Informationen benötigt werden, damit der Generalauftragnehmer mit der Angebotserstellung beginnen kann. Füllt der Kunde ihn nicht vollständig aus, weiß

der Generalauftragnehmer, welche Informationen noch fehlen und kann sie bspw. in persönlichen Interviews oder Begehungen des Objekts vervollständigen.

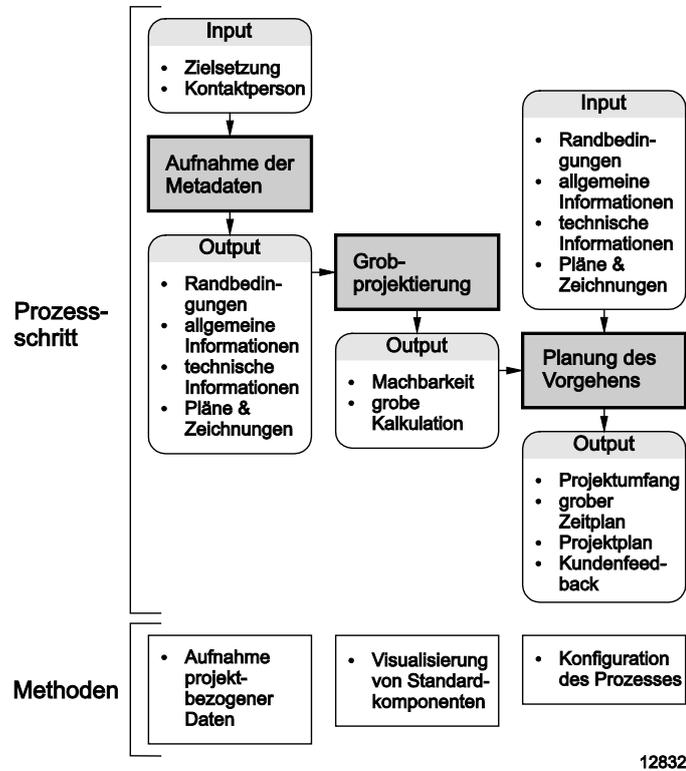


Abbildung 4-1: Initialisierung

Für den Umbau komplexer Investitionsgüter schreiben manche Kunden die Umbaumaßnahmen aus und kontaktieren nicht direkt einen Generalauftragnehmer. Dieses Vorgehen wählen die Kunden bei sehr hohem Investitionsvolumen, einer außergewöhnlich hohen Komplexität oder wenn sie mehrere Vergleichsangebote benötigen. Der Generalauftragnehmer überträgt diese Daten in den Fragebogen, um eine gleiche standardisierte Informationsbasis zu erhalten. In dem Fall gehen die benötigten Daten aus der Ausschreibung hervor.

Grobprojektierung

Die gesammelten Daten bilden die Grundlage für den zweiten Prozessschritt, die Grobprojektierung. Die Ziele sind dabei eine realistische Abschätzung, ob die geforderten Umbaumaßnahmen umsetzbar sind und eine grobe Kalkulation. Der Generalauftragnehmer kann eine erste Planung in einer sehr groben Detaillierungsstufe auf Basis der gelieferten Pläne durchführen. Er muss eventuell im Projekt auftretende Herausforderungen erkennen und diese in der Aufwandsabschätzung berücksichtigen.

Am Ende der Grobprojektierung muss ein erstes Lösungskonzept vorliegen. Im Falle einer Ausschreibung wägt der Generalauftragnehmer die Chancen und Risiken der weiteren Angebotserstellung ab und entscheidet über die Fortführung. Bei einer direkten Angebotsanfrage kontaktiert er den Kunden und stellt das Konzept vor. Dieses Vorgehen hat das Ziel, bereits in einer frühen Phase Ideen des Kunden zu integrieren. Eine Herausforderung an dieser Stelle ist es, dem Kunden die späteren Maßnahmen auf einem sehr abstrakten Level zu vermitteln. An dieser Stelle liegen in der Regel noch keine CAD-Modelle, Simulationen o.ä. vor. Dafür entwickelt die Arbeit eine Methode zur Visualisierung von Standardkomponenten in einem sehr frühen Entwicklungsstadium.

Planung des Vorgehens

Der letzte Prozessschritt der Initialisierung ist die Planung des Vorgehens. Ziel ist hier die Ermittlung des genauen Projektumfangs und die Terminierung des Projekts. Dafür benötigt der Generalauftragnehmer eine Methode zur Konfiguration des Prozesses. Diese unterstützt den Generalauftragnehmer in der Selektion der erforderlichen Prozessschritte und der Festlegung des Aufwands einzelner Schritte.

4.1.2 Aufnahme projektbezogener Daten

Die Arbeit entwickelt einen Fragebogen, um eine systematische Erfassung projektbezogener Daten für ein Umbauprojekt zu gewährleisten. Der Generalauftragnehmer übergibt diesen an den Kunden und bekommt ihn ausgefüllt zurück. Der Fragebogen ist standardisiert aufgebaut und dadurch aufwandsarm zu erstellen.

Die unterschiedlichen Branchen und umzubauenden Objekte erlauben keine Entwicklung eines allgemein gültigen Fragebogens. Die Systematik des Fragebogens sieht branchenübergreifend jedoch gleich aus. In Anlehnung an Reinders entwickelt die Arbeit einen Fragebogen aus vier Modulen [Rein11]:

- Instruktion
- Basisbereich
- Erweiterte Informationen
- Abschluss

Die Struktur ist von Reinders nach psychologischen Gesichtspunkten aufgebaut und zielt auf die Vollständigkeit der Beantwortung ab. Diese kann deshalb für Umbaumaßnahmen übernommen werden. Die Inhalte unterscheiden sich jedoch. Der Fragebogen ist dafür um weitere Datenpakete, wie bspw. Geometriedaten, erweitert.

Dieser Abschnitt stellt die Systematik des Fragebogens exemplarisch für die maritime Branche vor. Abbildung 4-2 visualisiert schematisch den Aufbau.

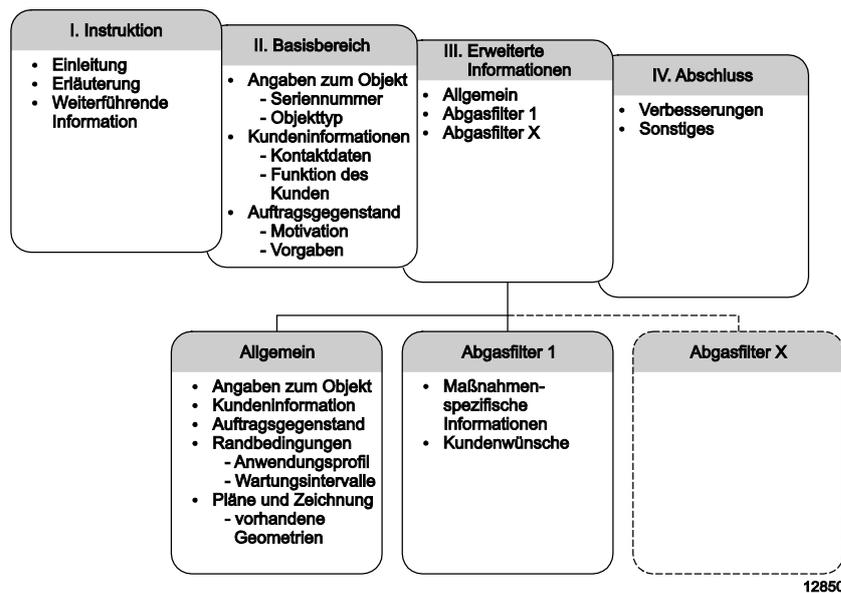


Abbildung 4-2: Schematischer Aufbau eines Fragebogens für Umbaumaßnahmen

Das Ziel der *Instruktion* ist es, dem Kunden den Aufbau, die folgenden Fragen und den Umgang mit zusätzlichen Informationen zu erläutern. Die Instruktion besteht aus einer Einleitung, einer Erläuterung und weiterführenden, bspw. rechtlichen Informationen. Sie dient als Wissensvermittlung und zur Transparenz für den Kunden und fragt noch keine Informationen ab.

Der *Basisbereich* ist der notwendige Bereich des Fragebogens. Er ist branchenspezifisch, aber unabhängig von der konkreten Umbaumaßnahme. Auf einer Seite fasst er alle wichtigen Informationen zusammen: Angaben zum umzubauenden Objekt, Angaben zum Kunden und den Auftragsgegenstand. Der Generalauftragnehmer benötigt alle hier abgefragten Informationen, um ein Angebot erstellen zu können. Die Angaben zum Objekt beschreiben in der maritimen Branche das Schiff und fragen die Klassifikationsgesellschaft, die IMO-Nummer und das typische Einsatzprofil des Schiffes ab. Die Angaben zum Kunden beinhalten die Kontaktdaten und die Funktion des Kunden (Charterer, Reeder). Im letzten Teil des Basisbereichs sammelt der Fragebogen Informationen über die gewünschte Umbaumaßnahme: Was führt zu der Anfrage (Limitierung von Emissionen, Leistungssteigerung durch den Einbau neuer Motoren) und wichtige zusätzliche Vorgaben (Umbauzeitpunkt, Umbauwerft). Eine Besonderheit des Fragebogens ist die Abfrage nach vorhandenen Geometriedaten. Diese benötigt der Generalauftragnehmer für die weitere Planung. Häufig liegen zwar Geometrieinformationen beim Kunden vor, die Qualität ist in der Regel für die vollständige Bearbeitung des Angebots jedoch nicht ausreichend. Diese Informationen können den Generalauftragnehmer in der weiteren Bearbeitung aber unterstützen. Der Basisbereich des Fragebogens weist den Kunden darauf

hin, vorhandene Geometrieinformationen anzufügen. Anhang A stellt den Basisbereich des Fragebogens für die maritime Industrie dar.

Die *erweiterten Informationen* sind in mehrere Detaillierungsstufen unterteilt. Die Umbaumaßnahme steuert den Inhalt und Umfang dieses Hauptteils. Die erste Stufe erfasst weitergehende Informationen zu den Kategorien aus dem Basisbereich und vorliegende Rahmenbedingungen. Das sind bspw. eine detaillierte Route des Schiffs mit den Häfen und Liegezeiten oder Informationen zu den Geometrien (Datum der vorhandenen Zeichnungen, Dokumentationen bereits erfolgter Umbauten). Die zweite Stufe geht auf die umzubauende Technologie ein und erfasst maßnahmenspezifische Informationen. Soll bspw. eine technische Lösung Emissionen im Abgas reduzieren, erfasst der Fragebogen an dieser Stelle technische Vorgaben für die zulässigen Schadstoffemissionen oder die typischen Wartungsintervalle des Objekts. Zusätzlich nimmt er an dieser Stelle bereits vorhandene Ideen des Kunden auf. Viele der in diesem Teil auftretenden Fragen sind offen gestaltet und lassen freie Antworten zu.

Der *Abschluss* des Fragebogens beinhaltet Interessenfragen des Generalauftragnehmers und stellt freiwillige Angaben des Kunden zur Verbesserung des Prozesses und sonstigen Angaben dar.

Die Strukturierung des Fragebogens erlaubt eine Priorisierung der einzelnen Bereiche. Der Kunde muss dem Generalauftragnehmer mindestens die Basisinformationen zur Verfügung stellen, um eine weitere Angebotsbearbeitung zu gewährleisten. Dieser Basisbereich sollte möglichst standardisierte Fragen beinhalten und die minimale Menge der benötigten Informationen abbilden. Der Generalauftragnehmer muss für die Umbaumaßnahmen komplexer Investitionsgüter einmalig ein vollständiges Set des Fragebogens entwickeln.

4.1.3 Visualisierung von Standardkomponenten

Der Generalauftragnehmer erarbeitet ein erstes grobes Lösungskonzept auf Basis der aufgenommenen Informationen. Die zu verbauenden Komponenten sind dabei häufig bereits konstruiert und die Herausforderung liegt in ihrer Integration in die vorhandene Umgebung, da sie das gesamte Objekt beeinträchtigen können (vgl. Abschnitt 2.2.3). Das Verständnis und die Akzeptanz des Kunden für die Lösung beeinflusst in hohem Maße die spätere Auftragswahrscheinlichkeit. Ein Ziel der Visualisierung von Standardkomponenten ist deshalb, die Ausmaße und Auswirkungen der Umbaumaßnahmen dem Kunden zu einem möglichst frühen Zeitpunkt im Prozess zu vermitteln.

Um das Ziel zu erfüllen, muss die entwickelte Methode mit der vorhandenen Datengrundlage auskommen. Die Grundlage beinhaltet dabei ein erstes Lösungskon-

zept, das der Generalauftragnehmer anhand von Generalplänen erarbeitet hat (Lösung meist in 2D). Zusätzlich müssen Informationen über die neuen Komponenten vorliegen. In der Praxis ist dies meistens durch einen Standardkatalog gegeben (meist in 3D). Untersuchungen in der Praxis während der Methodenentwicklung haben gezeigt, dass eine Darstellung und Diskussion der Lösung mit dem Kunden auf Basis der Generalpläne nicht ausreicht, weil der Kunde diese oft nicht richtig interpretieren und sich die neue Lösung deshalb nicht vorstellen kann. Die Methode sollte dies berücksichtigen und dem Kunden das Lösungskonzept aufwandsarm und gleichzeitig verständlich vermitteln.

Eine Technologie, die das Potenzial dazu hat, die Kriterien zu erfüllen, ist Augmented Reality (AR). AR blendet dem Benutzer virtuellen Inhalt in der realen Umgebung in Echtzeit ein (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die Arbeit untersuchte unterschiedliche Hardware für einen industriellen Einsatz. Für die vorliegende Problemstellung identifizierte sie Tablet-Computer als am besten geeignete Geräte, weil sie eine Benutzung mit mehreren Personen erlauben und intuitive Bedienkonzepte liefern. Andere Technologien weisen einige Nachteile auf. So sind AR-Brillen für die Benutzung durch eine Person ausgelegt; Projektionen müssen an einer Stelle aufgebaut und kalibriert werden. Das macht sie unflexibel und für die vorliegende Problemstellung ungeeignet. Untersuchungen von Bauernhansl bestätigen die Auswahl [Baue14]. Tablet-Computer bieten den benötigten Funktionsumfang und erfüllen alle Kriterien.

Um diese Technologie für die Visualisierung von Standardkomponenten in der Angebotserstellung nutzen zu können, entwickelt die Arbeit ein System (Software) mit dem entsprechenden Funktionsumfang. Das System stellt Komponenten aus einem Katalog in der realen Umgebung dar. Der Generalauftragnehmer kann verschiedene, vordefinierte Lösungen in das System laden und sie dem Kunden demonstrieren.

Die Ausrichtung der Komponenten – das Tracking – erfolgt über am Objekt angebrachte Marker. Andere Trackingverfahren wie kantenbasierte oder hybride Ansätze sind zu diesem Zeitpunkt nicht einsetzbar, da noch keine detaillierten Geometrieinformationen vorliegen. Die AR-Software erkennt den Marker im Kamerabild des Tablets und richtet die Komponenten relativ dazu aus. Eine Verschiebung des Markers ermöglicht es so, die Komponenten im Kamerabild zu verschieben. Über den angeschlossenen Komponentenkatalog kann der Benutzer die Szene verändern und weitere Komponenten laden oder vorhandene ersetzen.

Die komplexen Investitionsgüter und die Umgebungen des Umbauorts unterscheiden sich in aller Regel. Es liegen immer unterschiedliche Platzverhältnisse und Umgebungsstrukturen vor. Zudem ist die Entfernung des Benutzers mit dem Tablet vom betrachteten Objekt immer unterschiedlich. Aus diesen Gründen muss die Markergröße jeweils an die Rahmenbedingungen angepasst sein. Dafür stehen dem

Benutzer unterschiedlich große Marker zur Verfügung. Der Nutzer gibt die Größe des verwendeten Markers an. Die AR-Software kann aus dieser Information berechnen, wie groß es die Komponenten im Kamerabild darstellen muss, um die Größenverhältnisse einheitlich darzustellen. Umgebungsinformationen sind an dieser Stelle nicht vorhanden. Befinden sich Objekte vor dem Marker, überblendet der Tablet-Computer diese Objekte mit den Komponenten. Der räumliche Eindruck ist dadurch zwar verfälscht, diesem Nachteil steht jedoch der Vorteil der sofortigen Verfügbarkeit gegenüber [Tito15]. Abbildung 4-3 zeigt die Planung einer neuen Absauganlage und visualisiert den Aspekt. Die dargestellten Komponenten sind zwar an der richtigen Position, erscheinen jedoch vor der Maschine (unten im Bild) und dem Gelände (mittig im Bild). Der Generalauftragnehmer kann direkt und ohne aufwändige Vorbereitung die neuen Komponenten am realen Objekt darstellen. Das System erlaubt so bereits in einer sehr frühen Phase, Wünsche, Ideen und Vorgaben des Kunden in die Planung zu integrieren.

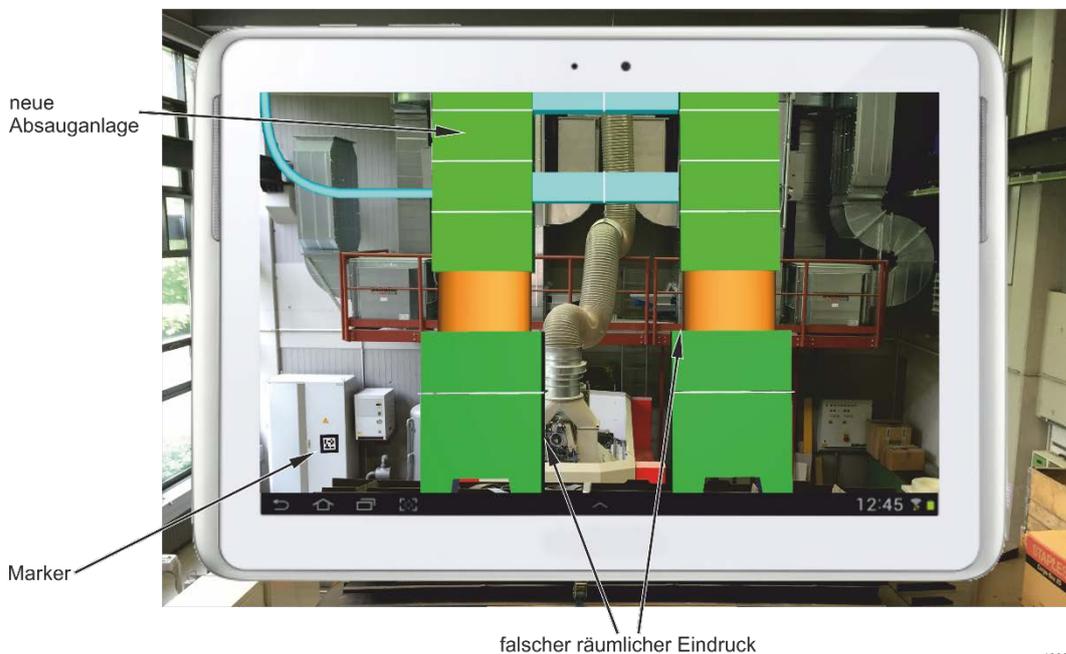


Abbildung 4-3: AR-System zur Visualisierung von Standardkomponenten [Tito15]

4.1.4 Konfiguration des Prozesses

Häufig sind Generalauftragnehmer gezwungen, den Angebotserstellungsprozess an die Rahmenbedingungen des Projekts anzupassen. Bereits vorliegende Informationen oder die Vergabe einzelner Tätigkeiten an externe Unterauftragnehmer beeinflussen die tatsächliche Prozesszusammensetzung. Das Ziel des Generalauftragnehmers ist die Konfiguration und Terminierung eines angepassten Angebotserstellungsprozesses.

Die Arbeit betrachtet im Folgenden jede Angebotserstellung als ein separates Projekt des Generalauftragnehmers, weil jede Angebotserstellung eine personalisierte Lösung beinhaltet, der Ablauf nicht immer der gleiche ist und das primäre Ziel eine Problemlösung ist. Diese Betrachtungsweise erfordert einen individuellen Projekt-ablaufplan und dessen Terminierung.

Eine klassische Projektplanung (bspw. ein Gantt-Diagramm in Projektplanungssoftware) in der Initialisierung der Angebotserstellung wäre sehr aufwendig und ist zu diesem Zeitpunkt nicht geeignet. Der Generalauftragnehmer benötigt dafür eine automatisierte und für Umbauprozesse geeignete Methode. Zudem muss der angepasste Prozess im Verlauf der Angebotserstellung weiter veränderbar und adaptierbar sein, damit der Generalauftragnehmer auf hinzukommende Erkenntnisse oder weitere Rahmenbedingungen reagieren kann. Wie in Abschnitt 3.4.1 hergeleitet, sollte die Methode den Prozess zudem terminieren können und eine Weiterbearbeitung in gängigen Werkzeugen (bspw. einer Projektplanungssoftware) ermöglichen.

Die Konfiguration des Prozesses erfolgt auf vier Ebenen:

- Vorgaben: Allgemeine Angaben vom Kunden
- Schrittauswahl: Auswahl der Prozessschritte
- Detailkonfiguration: Detaildefinition der Outputs einzelner Prozessschritte
- Terminierung: Festlegung der Plan-Endtermine einzelner Schritte und Meilensteine

Die ersten drei Ebenen dienen der Auswahl der benötigten Schritte für den Projektablaufplan. Der Detaillierungsgrad steigt dabei von den Vorgaben bis zur Detailkonfiguration des Prozesses. Die oberste Ebene berücksichtigt die aus dem Fragebogen erhaltenen Informationen (vgl. Abschnitt 4.1.2), wie bspw. die angefragte Technologie. In der Schrittauswahl wählt der Generalauftragnehmer die benötigten Schritte aus. Liegen bspw. 3D-Daten bereits vor, so muss der Schritt der Geometrieerfassung nicht mehr stattfinden. Die Detailkonfiguration detailliert die Schrittauswahl bei Bedarf, indem sie die Auswahl auf Outputebene ermöglicht. Dies ist bspw. sinnvoll, wenn in der Variantenplanung und -bewertung aufgrund der vorliegenden Komplexität keine Absicherungen notwendig sind. Die letzte Ebene, die Terminierung, legt Plan-Endtermine für die einzelnen Arbeitspakete fest. Abbildung 4-4 stellt den Aufbau schematisch dar. Der Generalauftragnehmer kann während der Konfiguration des Projektablaufplans bei Bedarf in die oberen Ebenen zurückkehren und Änderungen vornehmen.

Die Methode basiert auf den logischen, prozessbedingten und zeitlichen Zusammenhängen der einzelnen Schritte (vgl. Abschnitt 3.3). Sie stellt eine Logik vor und beschreibt die einzelnen branchenspezifischen Faktoren. Diese muss der Generalauftragnehmer einmal systematisch erheben.

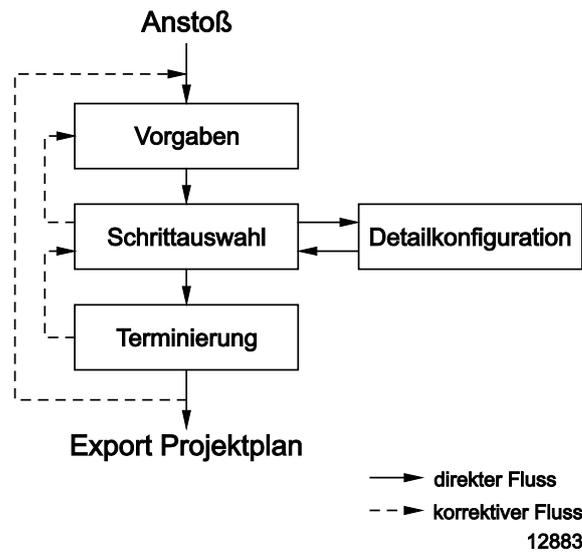


Abbildung 4-4: Konfiguration des Prozesses

Vorgaben

Das Ziel der obersten Ebene ist es, die vom Kunden vorgegebenen Rahmenbedingungen für den Aufbau des Projektablaufplans zu berücksichtigen und dadurch den vollständigen Angebotserstellungsprozess (vgl. Abschnitt 3.2.1) auf die notwendigen Schritte zu reduzieren. Die Erkenntnisse aus dem Fragebogen (vgl. Abschnitt 4.1.2) fließen an dieser Stelle ein. Es handelt sich um Informationen über den Auftragsinhalt, die einzusetzende Technologie, geplante Vergaben einzelner Tätigkeiten durch den Kunden, etc.. Der Generalauftragnehmer gibt diese Informationen über eine Eingabemaske ein. Zur Vereinfachung stehen ihm dafür nur Einzelauswahlen oder Mehrfachauswahlen zur Verfügung (Abbildung 4-5). Frei formulierte Informationen, wie bspw. vom Kunden angegebenen Text, kann der Generalauftragnehmer nicht direkt eintippen, sondern muss diese interpretieren und in der vorgegebenen Struktur verarbeiten. Dies stellt ein standardisiertes Vorgehen sicher und ermöglicht eine einheitliche Konfiguration unterschiedlicher Prozesse.

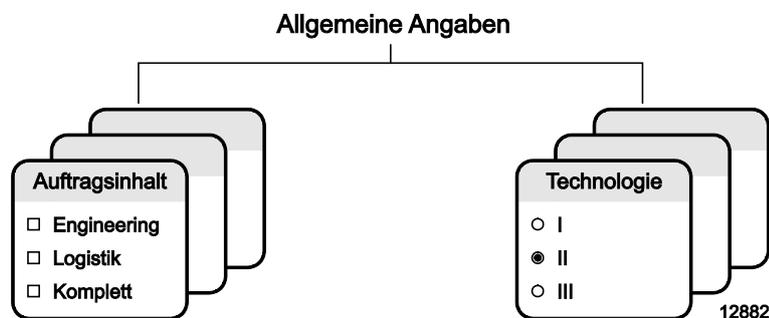


Abbildung 4-5: Allgemeine Angaben der Konfiguration des Prozesses

Schrittauswahl

Das Ziel der zweiten Ebene ist eine weitere Reduzierung und Anpassung des Angebotserstellungsprozesses. Nicht systematisierbare Rahmenbedingungen und Einflüsse des Generalauftragnehmers wirken hier ein. An dieser Stelle kann der Generalauftragnehmer weitere Prozessschritte oder Prozessphasen manuell deaktivieren oder wieder aktivieren. Die hinterlegte Logik unterstützt den Benutzer. Wählt er bspw. die Aufnahme der Ist-Geometrie ab, so entfällt auch das Reverse Engineering (Abbildung 4-6).

Aus der Planung kann der Benutzer eine weitere Detailkonfiguration vornehmen oder direkt zur Terminierung voranschreiten.

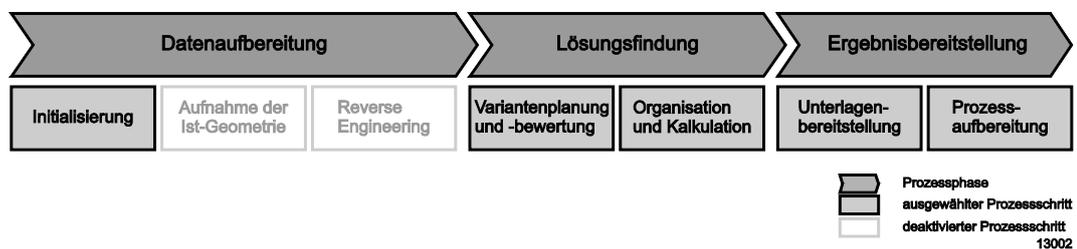


Abbildung 4-6: Beispielhafte Schrittauswahl des Prozesskonfigurators

Detailkonfiguration

Nachdem der Angebotserstellungsprozess auf die für das jeweilige Projekt benötigten Schritte beschränkt wurde, ermöglicht die Detailkonfiguration eine Anpassung der benötigten Outputs innerhalb einzelner Schritte und stellt damit den höchsten Detaillierungsgrad der Methode dar. Der Benutzer kann einzelne Outputs aus dem Prozess manuell entfernen. Abbildung 4-7 zeigt beispielhaft das Vorgehen für den Prozessschritt Initialisierung. Zusätzlich berücksichtigt die Methode die Aufwände zu jedem Output. Diese sind entweder fix oder variabel (vgl. Abschnitt 3.3.3). Der Benutzer kann an dieser Stelle die variablen Aufwände anpassen.

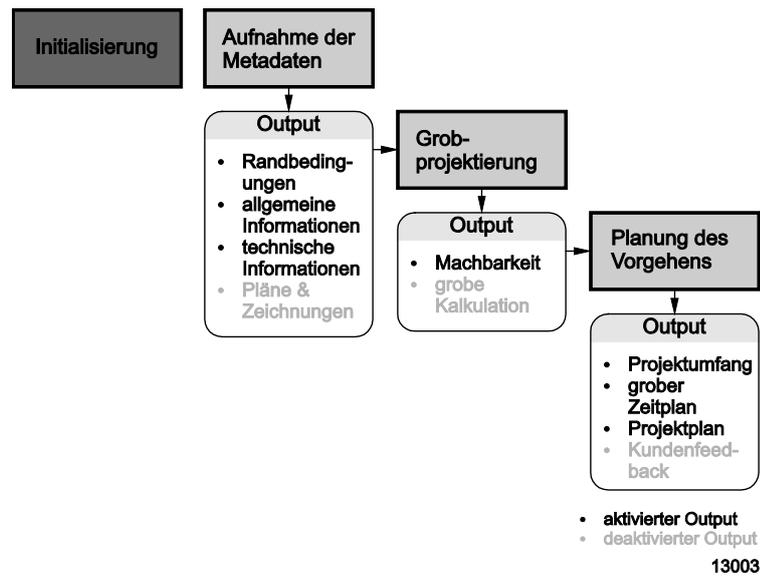


Abbildung 4-7: Detailkonfiguration des Prozesskonfigurators

Terminierung

Nach der Detailkonfiguration sind die Inhalte der Schritte bekannt und der Prozess konfiguriert. Das Ziel der letzten Ebene ist es, den angepassten Angebotserstellungsprozess zu terminieren und einen vollständigen, an die jeweilige Umbaumaßnahme angepassten Projektablaufplan bereitzustellen. Dafür gibt der Generalauftragnehmer das Anfangs- und das Enddatum des Prozesses ein und legt Plan-Endtermine für die einzelnen Prozessschritte fest. Zusätzlich kann er Meilensteine im Prozess definieren und terminieren. Sinnvolle Meilensteine im Angebotserstellungsprozess sind nach der Datenaufbereitung und nach der Lösungsfindung (vgl. Abschnitt 3.3.4, Abbildung 3-8).

Vorgaben des Kunden erfordern unterschiedliche Terminierungsstrategien, auf die der Generalauftragnehmer reagieren muss. Die Methode berücksichtigt diese und stellt anhand der vom Generalauftragnehmer gewählten Strategie den Prozessplan zusammen. Auf dem kritischen Pfad werden die Schritte direkt hintereinander gesetzt, sobald alle benötigten Inputs vorhanden sind. Bei den anderen Arten der Terminierung stellt der Generalauftragnehmer ein, ob die Puffer abhängig von den Schritten oder den Outputs gesetzt werden. Im ersten Fall fängt eine Pufferzeit erst an, sobald alle Outputs eines Schritts vorliegen. Andernfalls beginnt der Puffer, sobald alle Outputs für einen nachfolgenden Schritt vorliegen.

Nach der Terminierung steht ein angepasster und terminierter Projektplan bereit. Die geforderte Exportfunktion ist als eine Schnittstelle in einem neutralen Datenformat definiert. Dafür ist ein offenes und textbasiertes Format geeignet. Alle gän-

gigen Projektmanagementwerkzeuge (bspw. MS Project) können ein solches Format importieren. Neben dem Projektplan stellt die Methode eine Checkliste mit den Outputs, den Vorgabezeiten und den Plan-Endterminen für die einzelnen Schritte bereit.

Eine ständige Erweiterung der Datenbasis während der Angebotserstellung, neue Erkenntnisse oder auftretende Probleme zwingen den Generalauftragnehmer dazu, den Plan anzupassen. Dazu kann er entweder die Projektmanagementwerkzeuge oder die hier vorgestellte Methode verwenden. Die Auswahl hängt vom Prozessfortschritt und der Komplexität ab. Die Methode berücksichtigt eine nachträgliche Anpassung des Plans und erlaubt es dem Generalauftragnehmer, entweder einzelne Schritte der Methode zu adaptieren oder den Prozess bei größeren Änderungen neu zu konfigurieren.

4.2 Aufnahme der Ist-Geometrie

4.2.1 Geometrische Grundlage

Der zweite Schritt der Datenaufbereitung ist die Aufnahme der Ist-Geometrie. Das Ziel des Schritts ist es, eine geometrische Grundlage für die Entwicklung des Planungsmodells zu schaffen. Obwohl dieser Schritt der Aufnahme von Daten dient und damit ein ähnliches Ziel wie die Initialisierung verfolgt, ist er von ihr entkoppelt: Erstens übersteigt der Aufwand einer Geometrieerfassung den Aufwand der Metadatenaufnahme deutlich. Zweitens vergeben Generalauftragnehmer solche Tätigkeiten häufig an externe Unterauftragnehmer. Und drittens gilt es diesen Aufwand vor dem ersten Kundenfeedback und der finalen Entscheidung, das Angebot zu erstellen, zu vermeiden.

Die Geometrieaufnahme ist für die Erstellung eines vollständigen Angebots für Umbaumaßnahmen bereits existierender Güter unerlässlich (vgl. Abschnitt 2.3.2). Ziel dieses Schrittes ist es daher, die Geometrie in der benötigten Datenqualität und mit dem benötigten Datenvolumen zu erfassen. Das Vorgehen ist in die zwei Teilschritte Auswahl und Vorbereitung sowie die Raumgeometrievermessung geteilt (s. Abbildung 4-8).

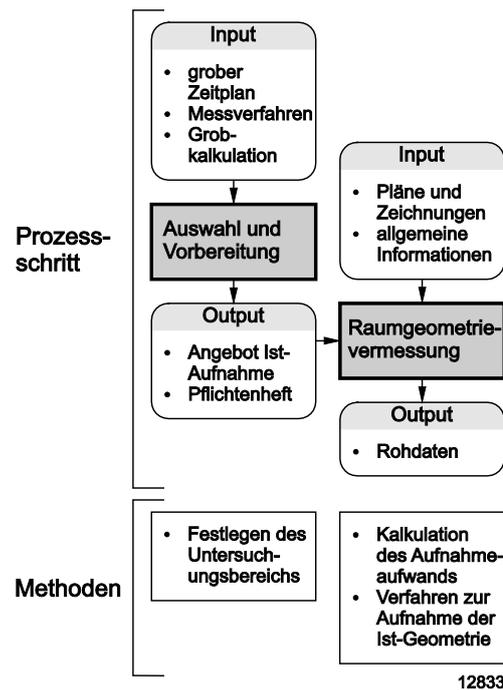


Abbildung 4-8: Aufnahme der Ist-Geometrie

Auswahl und Vorbereitung

Für Umbaumaßnahmen ist in der Regel die Geometrie nur einzelner, potenzieller Bereiche der Umbauobjekte und der dazugehörigen Umgebung relevant. Eine unvorbereitete Geometrieerfassung ist bei großen und komplexen Objekten in der Regel nicht sinnvoll, weil sie häufig zu zwei Problemen führt:

- Der Vermesser erfasst die relevanten Bereiche nicht vollständig.
- Der Vermesser erfasst nicht relevante Bereiche.

Erfasst der Vermesser nicht alle benötigten Bereiche, fehlen dem Generalauftragnehmer Informationen. Die Folge sind weitere Messungen, die zusätzliche Kosten verursachen. Erfasst der Vermesser neben den relevanten Bereichen weitere, nicht benötigte Bereiche, steigt der eingesetzte Aufwand und damit die Kosten. Ziel dieses Teilschritts ist es daher, die relevante Ist-Geometrie auszuwählen und klare Anforderungen für die spätere Aufnahme zu definieren.

Dafür muss der Generalauftragnehmer die relevanten Bereiche zunächst selektieren und klassifizieren. Nicht jeder Bereich benötigt die gleiche Datenqualität im späteren Planungsmodell. Die Umgebung des Objekts kann bspw. sehr entscheidend sein oder nur eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Um diese Zuordnung vornehmen zu

können, entwickelt die Arbeit eine Methode zur Festlegung der Untersuchungsbe-
reiche. Das Ergebnis sind Zonen mit festgelegten Kriterien für die Vermessung. Die
Methode ermöglicht es dem Generalauftragnehmer, ein Lastenheft für die Vermes-
sung zu erstellen.

Raumgeometrievermessung

Das Ziel des Teilschritts Raumgeometrievermessung ist es, die vorhandene Geo-
metrie unter Beachtung der gestellten Anforderungen zu erfassen. Besondere Rand-
bedingungen können diesen Schritt beeinflussen. Bei einem Fährschiff bspw. ist die
maximale Durchführungszeit der Aufnahme durch die Liege- bzw. Umschlagszeit
des Schiffes begrenzt, weil die meisten Verfahren eine ruhige, vibrationsfreie Um-
gebung benötigen. Zusätzlich benötigen die Verfahren ein uneingeschränktes Sicht-
feld auf die Messpunkte. Öffentliche Bereiche wie Laderäume sind in der Um-
schlagszeit hochfrequentiert und erschweren dadurch häufig die Aufnahmen.

Um alle Aspekte zu berücksichtigen führt der Generalauftragnehmer oder ein ex-
terner Vermessungsdienstleister eine Vorplanung durch. Da die Vermessung häufig
nicht zu den Kompetenzen der Generalauftragnehmer gehört, verwendet die Arbeit
im Folgenden die Begriffe Vermessungsdienstleister oder Vermesser.

In der Vorplanung legt der Vermesser die Vermessungsstrategie fest. Die beiden
Hauptziele sind den Aufnahmearbeit abzuschätzen und die richtige Aufnahme-
technologie zu ermitteln. Die Methode zur Kalkulation des Aufnahmearbeits un-
terstützt den Vermesser bei dieser Problemstellung. Sie berücksichtigt die Rahmen-
bedingungen und die unterschiedlichen Aufnahmetechnologien. Zusätzlich liefert
sie dem Generalauftragnehmer ein Werkzeug, um verschiedene Angebote der Ver-
messungsdienstleister zu validieren.

Nach der Vorplanung erfolgt die Vermessung vor Ort. Diese lässt sich in eine Vor-
bereitung, die Durchführung und die Nachbereitung aufteilen. Der Ablauf ist durch
die Vermessungsstrategie und die Technologie gegeben. Für eine Vermessung kom-
plexer Investitionsgüter eignen sich grundsätzlich das Laserscanning, die Photo-
grammetrie und die Vermessung mit 3D-Kameras. Diese Arbeit untersucht alle drei
Verfahren und vergleicht sie für die spezifischen Anwendungsfälle.

Das Ergebnis der Raumgeometrievermessung ist je nach Aufnahmetechnologie un-
terschiedlich und kann aus Messwerten in einer Tabellenkalkulation, Punktwolken
mit XYZ-Koordinaten oder Oberflächenmodellen bestehen (vgl. Abschnitt 2.4.1).
Diese Rohdaten muss der Vermesser in einem weiteren Schritt aufbereiten.

4.2.2 Festlegen des Untersuchungsbereichs

Die Untersuchungsbereiche beeinflussen wesentliche Schritte der Prozessphase Datenaufbereitung. Sie dienen als Input für die Planung der Ist-Geometrieaufnahme und die Rekonstruktion der Modelle. Damit beantworten sie die Frage „Was muss erfasst werden?“ (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Nach der Initialisierung liegt dem Generalauftragnehmer in der Regel nur ein Generalplan oder grober Umgebungsplan vor. Er beinhaltet dabei das Schema des Untersuchungsobjekts. In den betrachteten Branchen umfasst dies alle größeren Komponenten und Informationen zur Umgebung. Auf dieser Grundlage definiert der Generalauftragnehmer die Untersuchungsbereiche. Dafür führt er zunächst eine Grobplanung durch und platziert die einzubauenden Komponenten räumlich in dem vorliegenden Plan. Der Platz der neuen Komponenten im System, Detailanforderungen der Komponenten und die geplanten Montageabläufe klassifizieren die aufzunehmenden Bereiche in vier Detaillierungsstufen:

- Kritische Komponenten und enge Raumverhältnisse erfordern einen hohen Detaillierungsgrad.
- Die nähere Umgebung der Komponenten und weniger kritische Bereiche erfordern einen mittleren Detaillierungsgrad.
- Bereiche für den Transport der Komponenten zum Verbauort und Verbindungsbereiche zwischen den anderen beiden Detaillierungsstufen erfordern einen geringen Detaillierungsgrad.
- Für die Umbaumaßnahmen nicht relevante Bereiche erfordern keine Erfassung der Geometrie.

Der Detaillierungsgrad ist von vielen Faktoren (Branche, Umbaumaßnahme, etc.) abhängig und daher nicht allgemeingültig definierbar. Er steuert jedoch maßgeblich den benötigten Aufwand der Geometrieerfassung. Der Generalauftragnehmer muss den Detaillierungsgrad für jede Problemstellung genau definieren. Weitere wichtige Einflussgrößen sind Farbinformationen und der Vollständigkeitsgrad der Informationen. Untersuchungen haben ergeben, dass der Generalauftragnehmer häufig nach Geometrien mit Farbinformationen anfragt. Der Vollständigkeitsgrad beschreibt, zu welchem Anteil die tatsächlich erfasste Geometrie den geplanten Erfassungsumfang abdeckt. Er wird vor allem durch Verdeckungen, durch Störgeometrien oder durch die Verwinklung einzelner Komponenten beeinflusst.

Nach der Platzierung der neu zu verbauenden Komponenten im System kann der Generalauftragnehmer das umzubauende Produkt nach den vier Detaillierungsstufen klassifizieren. Er legt damit die Areas of Interest (AOI) fest. Abbildung 4-9 stellt eine Klassifizierung der AOIs beispielhaft an einem Schiff für die Nachrüstung einer Abgasnachbehandlungsanlage dar. Der Abgasstrang ist als Bereich 1 klassifi-

ziert, der Maschinenraum als Bereich 2 und die technischen Räume und das Treppenhaus als Bereich 3. Alle weiteren Bereiche sind in diesem Beispiel nicht für die Umbaumaßnahmen relevant und können für die Aufnahme der Ist-Geometrie vernachlässigt werden (Bereich 4). Eine Besonderheit stellen an dieser Stelle mögliche Lösungsalternativen dar. In dem dargestellten Beispiel gehören zur Abgasnachbehandlungsanlage mehrere Komponenten, die außerhalb des Abgasstrangs verbaut werden können, wie die elektrischen Schaltschränke oder Tankreservoirs. Dies muss der Generalauftragnehmer berücksichtigen und vor der Klassifizierung der AOIs festlegen, wo die Komponenten platziert werden sollen.

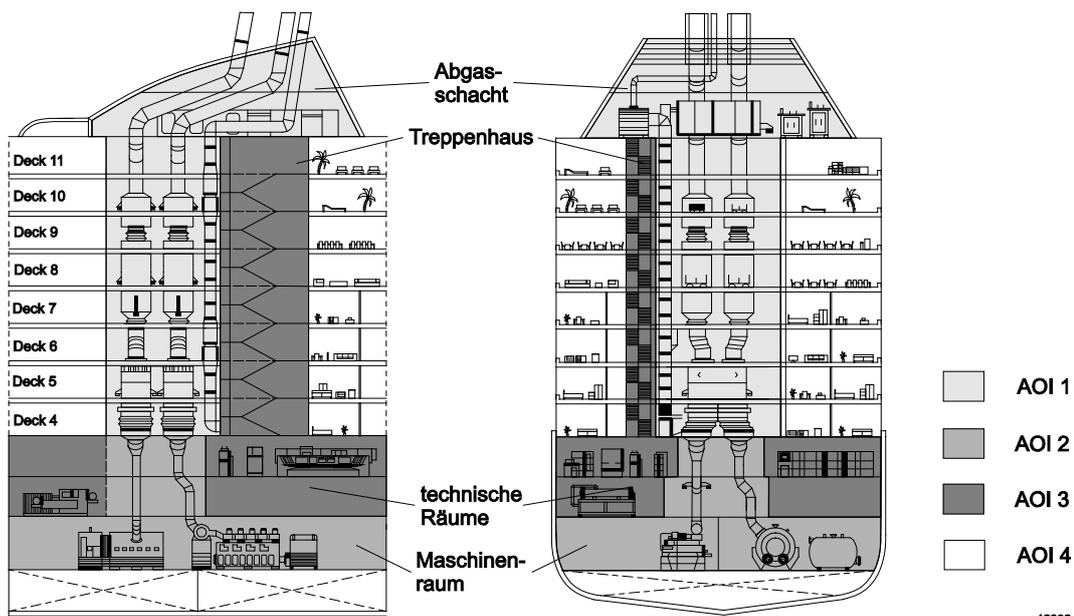


Abbildung 4-9: Areas of Interest (AOI)

4.2.3 Kalkulation des Aufwands

Das vorgegebene Zeitfenster, der Verbaustatus der Umgebung, die klassifizierten Untersuchungsbereiche und weitere Einflussgrößen bestimmen die Aufnahmen vor Ort. Ziel der Aufwandsabschätzung ist es, den Vermesser bei der Vorbereitung der Aufnahmen und der Wahl der passenden Aufnahmetechnologie zu unterstützen. Ein weiteres Ziel ist es, dem Generalauftragnehmer ein Werkzeug für die Validierung der Angebote verschiedener Vermesser bereitzustellen. Dafür schätzt die Methode den Aufwandsaufwand für die unterschiedlichen Technologien unter den vorliegenden Rahmenbedingungen ab. Der Generalauftragnehmer gibt mit den klassifizierten Untersuchungsbereichen die Anforderungsprofile vor. Die Dauer der Vermessung ist somit die Summe der Einzeldauern der klassifizierten Bereiche:

4 Datenaufbereitung

$$A_{A, g} = A_{A, AOI1} + A_{A, AOI2} + A_{A, AOI3} \quad (1)$$

$A_{A, g}$: *gesamter Aufnahmeaufwand [Min.]*

$A_{A, AOI1}$: *Aufnahmeaufwand des Bereichs AOI 1 [Min.]*

$A_{A, AOI2}$: *Aufnahmeaufwand des Bereichs AOI 2 [Min.]*

$A_{A, AOI3}$: *Aufnahmeaufwand des Bereichs AOI 3 [Min.]*

Aus mehreren Messreihen mit unterschiedlichen Technologien konnten die einzelnen Zusammenhänge abgeleitet werden. Die einzelne Aufnahmedauer setzt sich aus einem festen und einem volumenbasierten Zeitanteil zusammen:

$$A_A = T_F + T_V \quad (2)$$

$$T_V = A_M * N_M \quad (3)$$

$$A_M = T_{var} + T_{antS} \quad (4)$$

$$N_M = N_{M, n} * V_{A, AOI} \quad (5)$$

A_A : *Aufnahmeaufwand [Min.]*

T_F : *fester Zeitanteil der Aufnahme [Min.]*

T_V : *volumenbasierter Zeitanteil der Aufnahme [Min.]*

A_M : *Aufnahmeaufwand je Messung [Min.]*

T_{var} : *Dauer einer Messung [Min.]*

T_{antS} : *strategie-abhängiger Korrekturwert [Min.]*

N_M : *Anzahl der Messungen [-]*

$N_{M, n}$: *Anzahl der Messungen pro Volumenelement [-/m³]*

$V_{A, AOI}$: *Volumen der Aufnahmen eines AOI-Bereichs [m³]*

Der feste Zeitanteil ist unabhängig von der Anzahl der Messungen und beinhaltet Auf- und Abbaueiten, sowie die Vorbereitung vor Ort. Er ist durch Erfahrungswerte bestimmt und liegt häufig etwa im Bereich von vier Minuten bei Verwendung der Laserscanning-Technologie oder bei zwölf Minuten bei der Vermessung mit 3D-Kameras. Dieser Zeitanteil ist unabhängig vom zu erfassenden Objekt und stellt in der Regel einen sehr geringen Anteil der gesamten Aufnahmedauer dar.

Der volumenbasierte Zeitanteil berechnet sich als Produkt des Aufwands je Messung und der Anzahl der erforderlichen Messungen (Gl. 3). Der Aufwand je Messung kann aus einem technologieabhängigen Grundwert und einem vorgehensspezifischen Korrekturwert bestimmt werden (Gl. 4). Einstellungen unterschiedlicher Vermessungstechnologien bestimmen den Grundwert. Die Vermessungsqualität, die geforderte Genauigkeit oder Farbwerte der Aufnahmen beeinflussen diese Zeit. Für Technologien wie dem Laserscanning ergeben sie sich aus den Datenblättern des Herstellers. Der Korrekturwert bezieht sich nicht auf die einzelne Aufnahme, sondern auf das Vorgehen. Beim Laserscanning bspw. kann der Vermesser zwischen verschiedenen Vorgehen wählen: einer Aufnahme ohne Marker, mit vorher angebrachten Markern oder nach jeder Aufnahme immer weitergetragenen Markern. Dieser zeitliche Mehraufwand kann aus alten Projekten herangezogen werden.

Die Anzahl der Messungen (Gl. 5) ergibt sich als Produkt des Volumens mit der Anzahl der Messungen pro Volumenelement. Das Volumen der zu vermessenden Umgebung lässt sich dabei aus den vorgegebenen Untersuchungsbereichen (AOI) ableiten.

Den festen Zeitanteil der Aufnahme (T_F), den vorgehensspezifischen Korrekturwert (T_{ants}) und das zu vermessende Volumen (V_A) kann der Generalauftragnehmer aus Datenblättern und den vorliegenden Projekteinflussgrößen bestimmen. Die variablen Faktoren sind der volumenbasierte Anteil der Aufnahme (T_{var}) und die Anzahl der Messungen pro Volumenelement ($N_{M, n}$). Der volumenbasierte Anteil ist technologieabhängig und wird im folgenden Abschnitt näher untersucht. Die Anzahl der Messungen pro Volumenelement kann stark variieren und hängt neben der verwendeten Technologie von mehreren Einflussgrößen ab. Die Zusammenhänge dieser Einflussgrößen sind nicht linear und mussten empirisch ermittelt werden. Ein angepasster, systematischer Versuchsaufbau nach Kleppmann [Klep11] lieferte die normierte Anzahl benötigter Messungen in Abhängigkeit der Einflussgrößen in fünf Schritten:

- Untersuchungsziel festlegen
- Zielgrößen und Faktoren festlegen
- Versuchsplan aufstellen
- Versuche durchführen
- Versuchsergebnisse auswerten

Untersuchungsziel festlegen

Ziel der Untersuchung war es, die Einflussgrößen auf die Anzahl der benötigten Messungen zur Geometrieerfassung komplexer Investitionsgüter zu ermitteln.

Zielgrößen und Faktoren festlegen

Beobachtungen in der Praxis haben gezeigt, dass die Anzahl von Geometrieaufnahmen von unterschiedlichen Eigenschaften der Umgebung abhängt. Diese Eigenschaften sind die Größe der Objekte, die Anzahl der Objekte und die Vollständigkeit der Erfassung. Zusätzlich beeinflusst die eingesetzte Technologie die Anzahl der Aufnahmen. Es wurde folgender Zusammenhang vermutet:

$$N_{M,n} = f(AOI_V, D_T, V_T, Te) \quad (6)$$

$N_{M,n}$: Anzahl der Messungen normiert auf ein Volumenelement

AOI_V : Vollständigkeitsgrad der Aufnahme

D_T : Dichte der in der Umgebung vorhandenen Bauteile

V_T : durchschnittliches Volumen der in der Umgebung vorhandenen Bauteile

Te : Eingesetzte Aufnahmetechnologie

Um die Zusammenhänge für die einzelnen Einflussfaktoren abzuschätzen, wurden für den Versuchsaufbau die Einflussgrößen Vollständigkeitsgrad, Dichte und durchschnittliches Volumen in jeweils drei Stufen unterteilt. Dieser Detaillierungsgrad wurde so gewählt, dass er typische Umgebungen komplexer Investitionsgüter abdecken kann und in der Praxis einsetzbar ist. Dafür wurden mehrere Umgebungen betrachtet und gemeinsam mit Endanwendern Standardwerte ermittelt. Für die Versuchsmessungen wurde eine Grundfläche von 100 m² mit einer Standarddeckenhöhe von 3 m gewählt. Das normierte Standardvolumen ergibt sich dadurch zu 300 m³.

1. Vollständigkeitsgrad: Die Umgebungen komplexer Investitionsgüter enthalten in der Regel viele geometrische Objekte. Eine vollständige Erfassung der Objekte ist nur unter sehr hohem Aufwand erreichbar und ist für die Planung der Umbaumaßnahmen nicht unbedingt notwendig (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die drei definierten Stufen des Vollständigkeitsgrads reichen von 1 – vollständig bis 3 – unvollständig:

- 1 (vollständig): 70% aller Geometriedaten in dem Volumenelement sind erfasst.
- 2 (ausreichend): 50% aller Geometriedaten in dem Volumenelement sind erfasst.
- 3 (unvollständig): 30% aller Geometriedaten in dem Volumenelement sind erfasst.

Erfahrungen in der Praxis haben gezeigt, dass eine Erfassung von mehr als 70% der Geometriedaten für die weitere Angebotserstellung nicht notwendig ist.

2. Dichte: Die Dichte wird in Bauteilen pro Standardvolumenelement (300 m^3) angegeben. Typische Werte aus Umgebungen komplexer Investitionsgüter ergeben die drei Stufen der Dichte:

- 1 (voll): 100 oder mehr Bauteile pro Standardvolumenelement (mehr als 0,3 Bauteile pro m^3).
- 2 (moderat): 30 oder mehr, jedoch weniger als 100 Bauteile pro Standardvolumenelement (0,1 - 0,3 Bauteile pro m^3).
- 3 (leer): weniger als 30 Bauteile pro Standardvolumenelement (weniger als 0,1 Bauteile pro m^3).

3. Durchschnittliche Größe: Als relevante Bauteile zählen abgeschlossene Objekte, wie Pumpen oder Rohre. Einzelne Schrauben oder Werkzeuge fließen nicht in diese Werte ein, da sie ein Teil eines größeren Objekts sind und damit für den späteren Umbau als Einzelteil nicht relevant sind. Die durchschnittliche Größe bezieht sich damit nur auf die in der Umgebung vorhandenen Objekte:

- 1 (groß): größer als 3 m^3 .
- 2 (mittel): größer als 1 m^3 , jedoch kleiner als 3 m^3 .
- 3 (klein): kleiner als 1 m^3 .

Ein Nachteil der Aufteilung der Einflussgrößen in (nur) drei Stufen ist ein in der Kalkulation des Gesamtaufwands entstehender Fehler. Andere, detailliertere Ansätze sind in der Praxis jedoch kaum produktiv einsetzbar, da der Vermesser die Umgebung anhand von Zeichnungen bewerten muss, bevor er sie persönlich in Augenschein nehmen kann. Damit die Abschätzung des Erfassungsaufwands einen wesentlichen Mehrwert bringt, sollte der resultierende Fehler eine Größenordnung von 15% nicht überschreiten.

Versuchsplan aufstellen

Für die eigentliche Untersuchung wurde eine Testumgebung aufgebaut. Das Untersuchungsvolumen wurde auf eine Fläche von 100m^2 beschränkt. Um diese Fläche wurden Wände aufgebaut, um eine typische Umgebung innerhalb komplexer Investitionsgüter zu simulieren. Die berücksichtigte Höhe wurde auf 3m limitiert.

Die beschriebenen Einflussgrößen bestimmen die Messreihen. Mehrere Versuchsaufbauten wurden in der Versuchsumgebung realisiert. Bauteile unterschiedlicher Größe und in unterschiedlicher Anzahl wurden in der Umgebung platziert und mit den unterschiedlichen Vollständigkeitsanforderungen aufgenommen (Abbildung 4-10). Die Kombinationen aus einer durchschnittlichen Bauteilgröße größer als 3m^3

(groß) und der Dichte der Bauteile von 30 oder mehr Bauteilen pro Standardvolumenelement (moderat und voll) konnten aufgrund der Größe in der Testumgebung nicht realisiert werden.

Stufe	1	2	3
Vollständigkeitsgrad [%]	70	50	30
Dichte der Bauteile [$1/300\text{m}^3$]	>100	30-100	<30
durchschnittliche Größe [m^3]	>3	1-3	<1

13009

Abbildung 4-10: Versuchsplan für die Identifikation der Anzahl der Messungen pro Volumenelement

Als Technologien wurden das Laserscanning und die Vermessung mit 3D-Kameras ausgewählt. Untersuchungen haben gezeigt, dass Aufnahmen mit 3D-Kameras zeitlich limitiert sind (vgl. Abschnitt 4.2.4) und deshalb ebenfalls mehrere Aufnahmen in einer Umgebung notwendig sind. Auf das Photogrammetrie-Verfahren wurde verzichtet, da es nur einzelne Messwerte liefert und der Aufwand zu groß gewesen wäre, um die angestrebte Vollständigkeit zu erreichen.

Versuche durchführen

Zunächst wurden die Bauteile in die Versuchsumgebung gebracht. Die Anordnung erfolgte zufällig, allerdings blieben Wege zwischen den Bauteilen begehbar. Jeder Aufbau wurde zunächst mit dem Laserscanner in den drei geforderten Vollständigkeitsgraden erfasst. Das Vorgehen wurde mit der 3D-Kamera wiederholt. Anschließend erfolgte ein neuer Aufbau.

Etwa 30% aller Aufnahmen mit 3D-Kameras waren fehlerhaft und mussten wiederholt werden. Dies lag vor allem am Lichteinfall und an den großen glatten Flächen bei großen Bauteilen. Die Aufnahmen mit dem Laserscanner konnten alle verwendet werden.

Versuchsergebnisse auswerten

Abbildung 4-11 stellt exemplarisch die Ergebnisse der Messreihen für den Laserscanner dar. Sie zeigt die gemessene Beziehung zwischen der Anzahl der benötigten Aufnahmen und der Qualitätsstufe, der Dichte und der durchschnittlichen Bauteilgröße. Die Zahlen in der Abbildung geben die gemessene Anzahl der gemessenen Aufnahmen für die dargestellten Einflussgrößen an. Bei einer kleinen Bauteilgröße (kleiner als 1m^3) und einer geringen Dichte (weniger als 30 Teile pro Standardvolumen) bspw. wurden für die Vollständigkeit von 70% acht Laserscans benötigt, für die Vollständigkeit von 50% sechs Laserscans und für die Vollständigkeit

von 30% drei Laserscans. Die dargestellten Aufnahmeanzahlen für die Vollständigkeit von 70% und 50% konnten für große Bauteile und einem hohen Verbauungsgrad aus den oben beschriebenen Gründen nicht experimentell ermittelt werden und wurden aus den Steigungen der übrigen Verläufe abgeschätzt.

Die dargestellte Auswertung zeigt die Verläufe über dem Vollständigkeitsgrad. Die Auswertungen über die durchschnittliche Größe und die Dichte sind im Anhang B in einer Tabelle dargestellt. Weiterhin sind die Auswertungen für das Vermessen mit 3D-Kameras ebenfalls im Anhang dargestellt.

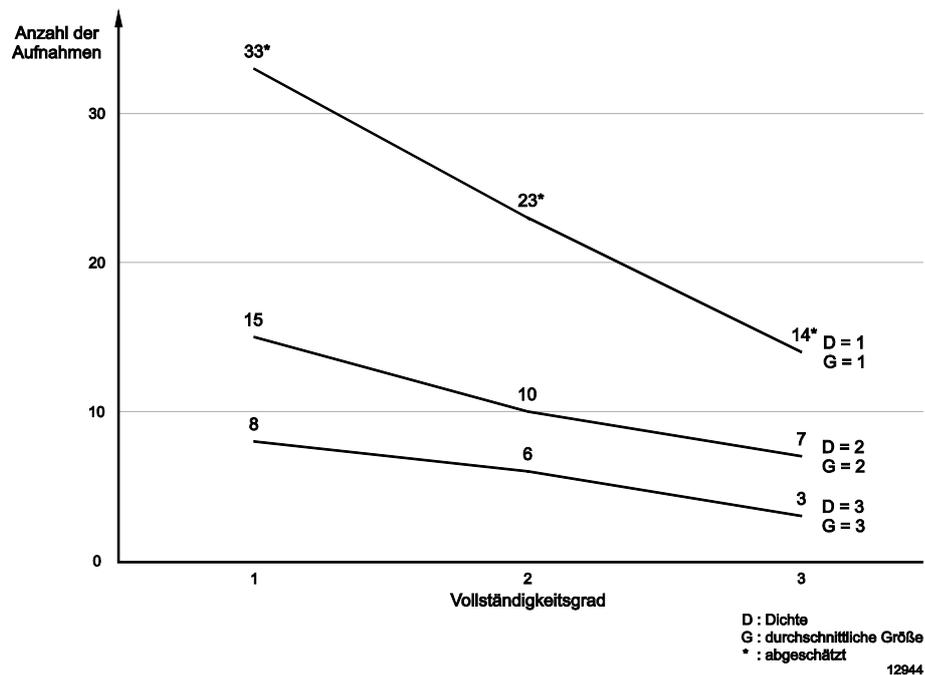


Abbildung 4-11: Benötigte Anzahl an Laserscanaufnahmen eines Volumenelements

Die in dieser Versuchsreihe ermittelten Werte stellen die gemessene Anzahl der Aufnahmen ($N_{M, n}$) für ein Standardvolumenelement von 300m^3 dar. Der Generalauftragnehmer kann den zu vermessenden Bereich (bspw. Maschinenraum, Büroraum, Abgasschacht) mit den drei beschriebenen Faktoren klassifizieren und die Anzahl der benötigten Aufnahmen in Abhängigkeit von der geforderten Vollständigkeit bestimmen. Diesen Wert kann er verwenden, um den Aufwand einer Aufnahme (A_A) zu berechnen (Gl. 2).

Jede Kombination der Einflussgrößen wurde mit beiden Technologien (nur) einmal erfasst, so dass der Versuchsumfang gering ist. Die Messungen haben jedoch die angenommenen Zusammenhänge ausnahmslos bestätigt und gezeigt, dass die An-

zahl der Aufnahmen von den Einflussgrößen Vollständigkeitsgrad, Dichte der Bauteile, durchschnittliche Größe der Bauteile und der ausgewählten Technologie abhängt. Die Ergebnisse wurden als erste Grundlage für die Abschätzung des Aufnahmearbeitsaufwands in praktischen Versuchen mit Laserscannern verwendet und haben sich dort bewährt (s. Evaluation, Abschnitt 7.2.2). Wiederholungen können die Abbildungsgüte weiter verbessern.

4.2.4 Verfahren zur Aufnahme der Ist-Geometrie

Mehrere Einflussgrößen beeinflussen den benötigten Vermessungsaufwand. Dieser Abschnitt untersucht den Einsatz unterschiedlicher Technologien für die Vermessung der Ist-Geometrie und erweitert die Technologien. Abschließend bewertet und vergleicht er die Eignung für die vorliegende Problemstellung.

Die manuelle Vermessung ist für eine wirtschaftliche Erfassung komplexer Investitionsgüter nicht geeignet und dient, bezogen auf den Vermessungsaufwand, als Referenz für die anderen Technologien (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Photogrammetrie

Die Stärken der Photogrammetrie liegen in der Aufnahme weniger komplexer Umgebungen, bei denen wenige Maße und nur bestimmte Umgebungskategorien vorliegen. Dadurch eignet sich die Photogrammetrie bspw. für die Aufnahme frei zugänglicher Umbauorte oder immer wiederkehrender Elemente (Muster). Zudem benötigt das Verfahren keinen Experten und keine kostenintensive Ausrüstung und ist damit für eine Voruntersuchung besonders geeignet.

Um die Photogrammetrie in der vorliegenden Problemstellung zu untersuchen, musste ein Verfahren für den Einsatz der Technologie entwickelt werden. Das Verfahren soll den Aufwand für die Aufnahmen reduzieren und die Qualität verbessern. Zugleich soll es zielgerichtete Aufnahmen von unerfahrenen Benutzern ermöglichen.

Eine signifikante Reduzierung des Aufwands erreicht der Generalauftragnehmer durch die Auslagerung der Aufnahme an den Kunden. Dadurch verbessert er die Datengrundlage bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt oder verzichtet sogar auf den Einsatz von Vermessungsdienstleistern. Das würde die Kosten für den Generalauftragnehmer und letztlich auch für den Kunden senken. Das Verfahren setzt nur eine Fotokamera beim Kunden voraus. Der Generalauftragnehmer erstellt einen Ablaufplan für die Vermessung, indem er jede relevante Messstelle im Generalplan markiert. Anschließend übersendet er dem Kunden einen Handlungsleitfaden für die Vermessung. Dieser Handlungsleitfaden besteht aus vier Elementen:

- Modifizierter Generalplan
- Anleitung für die Vermessung
- Kalibrierungsmuster
- Marker

Der Kunde platziert zunächst die Marker an den vorgegebenen Messstellen. Im nächsten Schritt kalibriert er die eigene Kamera mit dem mitgelieferten Muster. Die Anleitung beschreibt das Vorgehen detailliert, um Fehlbedienungen zu vermeiden. Anschließend nimmt der Kunde Fotos aus verschiedenen Perspektiven der Umgebung auf. Dabei müssen immer mindestens zwei Marker in einem Bild zu sehen sein.

Der Generalauftragnehmer vermisst die Entfernungen anhand der vom Kunden aufgenommenen Fotos zwischen den einzelnen Messstellen. Mehrere Testläufe in drei unterschiedlichen Umgebungen komplexer Investitionsgüter (insgesamt 1200 Fotos) haben bei dem Vorgehen sehr gute Ergebnisse erzielt. Als Nachteile des Verfahrens sind die Ausschussrate der Fotos und zusätzlich erforderliche, vorher nicht eingeplante Messstrecken zu nennen.

Die Praxis hat gezeigt, dass die Qualität der Messung stark vom Benutzer abhängt. In den durchgeführten Messungen konnte nur etwa jedes zweite Foto für die Messung verwendet werden. Ein weiterer Nachteil liegt in weiteren, anfangs nicht eingeplanten Messstrecken. Diese kann der Generalauftragnehmer nachträglich zwar bestimmen, solche Messungen sind jedoch häufig ungenau (der Fehler beträgt mehrere Zentimeter) und hängen von der Messrichtung im Foto (in die Tiefe oder von links nach rechts) ab.

Die Photogrammetrie ist für die Erstellung eines kompletten Umgebungsbilds kaum geeignet. Dafür wären sehr viele Messpunkte notwendig und die anschließende Aufbereitung wäre sehr aufwändig (vgl. Abschnitt 2.4.1). Zudem benötigen alle Messpunkte einzelne Marker; es ist jedoch nicht praktikabel, jeden Punkt mit einem solchen Marker zu versehen. Es wurde daher davon abgesehen, das Verfahren weiter zu untersuchen.

Terrestrisches Laserscanning

Der Einsatz von terrestrischem Laserscanning für die Aufnahme der Ist-Geometrie komplexer Investitionsgüter ist weit verbreitet. Um einen produktiven Einsatz unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen zu gewährleisten, wurde das Verfahren genauer untersucht. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, die Zusammenhänge der Zeitanteile einer Messung in den gegebenen Umgebungen zu identifizieren. In mehreren Messreihen wurde das Verfahren in der Praxis und in praxisnahen Umgebungen eingesetzt. Daraus konnte folgender Zusammenhang ermittelt werden:

$$T_{var, LS} = T_{S, Q} + T_F + T_U \quad (7)$$

$T_{var, LS}$: Dauer einer Messung mit dem Laserscanner [Min.]

$T_{S, Q}$: Netto-Scanzeit einer Messung abhängig von der Qualität [Min.]

T_F : Dauer der Farbaufnahmen [Min.]

T_U : mittlere Umbauzeit [Min.]

Datenblätter der jeweiligen Laserscanner beinhalten die Netto-Scanzeit und die Dauer der Farbaufnahmen. Die Umbauzeit stellt die Zeit zwischen den einzelnen Aufnahmen dar. Dies ist üblicherweise der Transport des Laserscanners an den nächsten Messpunkt. Im Wesentlichen scheint die Umbauzeit von der Umgebung (Treppe, beengte Verhältnisse, ebene Fläche) abzuhängen. Es wurde ein Mittelwert für die durchschnittliche Umbauzeit experimentell ermittelt. Dazu wurden sechs unterschiedliche Bereiche (A-F) aufgenommen (Abbildung 4-12). Die mittlere Umbauzeit liegt bei 59 Sekunden bei einer Standardabweichung von 39 Sekunden. Diese Werte erscheinen für den Umbau von Laserscannern in unterschiedlichen Umgebungen als realistisch.

Projekt	Einheit	A	B	C	D	E	F	Gesamt
Messungen	[-]	116	20	40	33	30	79	318
mittlere Umbauzeit	[Sek.]	55	42	69	42	56	73	59
Standardabweichung	[Sek.]	43	25	47	18	41	30	39

12851

Abbildung 4-12: Verteilung der Umbauzeit von Laserscannern

Mit Hilfe der hier ermittelten mittleren Umbauzeit lässt sich die Dauer einer Messung mit dem Laserscanner bestimmen (Gl. 7). Diese Zeit wird benötigt, um den Aufwand für die Geometrieerfassung abzuschätzen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Da bei einer Aufnahme der Geometrie in der Regel viele Aufnahmen notwendig sind, steigt die Zuverlässigkeit der Abschätzung und die relative Standardabweichung (Variationskoeffizient) sinkt. Diese Zusammenhänge sollen an einem Beispiel verdeutlicht werden: Bei nur einer Messung beträgt die mittlere Umbauzeit 59 Sekunden, bei einer Standardabweichung von 39. Der Variationskoeffizient (v) berechnet sich zu:

$$v = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{39 \text{ Sek.}}{59 \text{ Sek.}} = 0,66 \text{ oder } 66\% \quad (8)$$

v : Variationskoeffizient [-]

σ : Standardabweichung [Sek.]

μ : Erwartungswert [Sek.]

4 Datenaufbereitung

Der Erwartungswert (μ) ist dabei gleich der mittleren Umbauzeit (T_U). Sollen nun 100 Messungen (N_M) vorgenommen werden, muss zunächst der Erwartungswert der Messungen berechnet werden:

$$\mu_{ges} = \mu * N_M = 59 \text{ Sek.} * 100 = 5900 \text{ Sek.} \quad (9)$$

Um die gesamte Standardabweichung zu berechnen, müssen die Quadrate, also die Varianzen addiert werden:

$$\sigma_{ges}^2 = \sigma^2 * N_M \quad (10)$$

$$\sigma_{ges} = \sigma * \sqrt{N_M} = 39 \text{ Sek.} * \sqrt{100} = 390 \text{ Sek.} \quad (11)$$

Der Variationskoeffizient der 100 Messungen berechnet sich aus dem berechneten gesamten Erwartungswert und der gesamten Standardabweichung:

$$v_{ges} = \frac{\sigma_{ges}}{\mu_{ges}} = \frac{390 \text{ Sek.}}{5900 \text{ Sek.}} = 0,066 \text{ oder } 6,6\% \quad (12)$$

Mit steigender Anzahl der Messungen wird der Variationskoeffizient also immer kleiner (Abbildung 4-13). Für die Vermessung komplexer Investitionsgüter sind in der Regel mehrere hundert Messungen notwendig. Der wahrscheinliche Fehler der Abschätzung ist dadurch relativ gering.

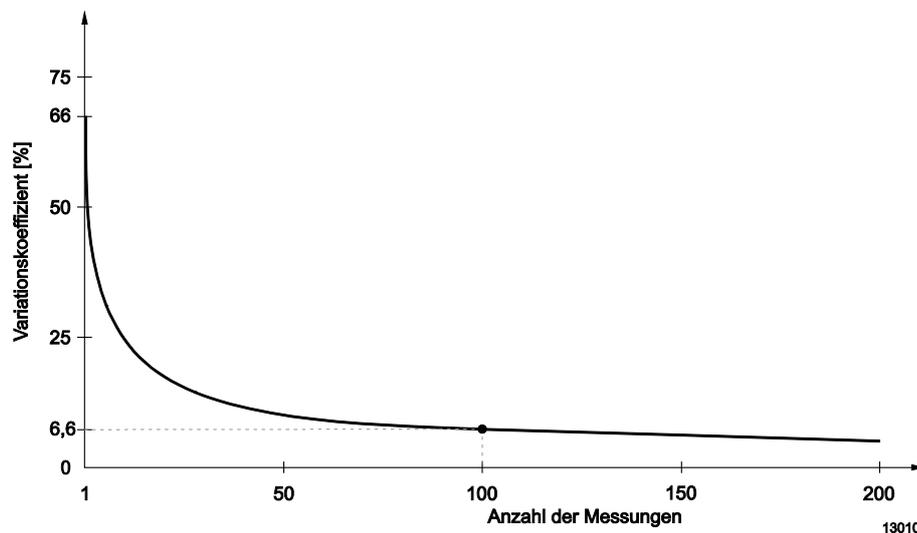


Abbildung 4-13: Variationskoeffizient des Umbaus von Laserscannern

3D-Kameras

Eine Alternative zu Laserscannern stellen 3D-Kameras dar. Der Vermesser erhält während der Aufnahme eine Rückmeldung und kann die Qualität der Aufnahme steuern. Zusätzlich liefert das Verfahren direkt ein Oberflächenmodell und reduziert damit den Aufwand für die Nachbereitung (vgl. Abschnitt 2.4.1). Das Verfahren wurde allerdings nicht für die Aufnahme großer Umgebung entwickelt. Um einen produktiven Einsatz in den betrachteten Branchen zu ermöglichen, musste die Aufnahmemethode in der Arbeit erweitert werden.

Ein Vermessungssystem besteht aus einem Rechner und der 3D-Kamera. Ein Algorithmus läuft auf dem Rechner. Dieser Algorithmus verarbeitet die aufgenommenen Daten (Infrarotbild, RGB-Bild) in Echtzeit, visualisiert dem Benutzer die erfasste Geometrie, verarbeitet Befehle des Nutzers und berechnet das Oberflächenmodell. Der limitierte Grafikspeicher des Rechners und die Signalreichweite der Kameras schränken den Aufnahmebereich auf einen Würfel ein. Versuche in praxisnahen Umgebungen erzielten gute Ergebnisse für Kantenlängen des Aufnahmewürfels zwischen zwei und fünf Metern. Komplexe Investitionsgüter sind in der Regel wesentlich größer und erfordern daher einen erweiterten Aufnahmebereich.

Das zweite Problem ist die Kommunikation zwischen der Kamera und dem Rechner. Die Anforderungen des Algorithmus an den Rechner sind sehr hoch. Portable Lösungen, wie Notebooks oder Tablet-Computer, sind nicht ausreichend, so dass ein stationärer Rechner notwendig ist. Der Algorithmus visualisiert dem Nutzer den aktuellen Erfassungszustand und bietet damit einen wichtigen Mehrwert gegenüber anderen Verfahren wie bspw. Laserscanning. Komplexe Investitionsgüter stellen in der Regel jedoch große Umgebungen dar. Beim Einsatz eines stationären Rechners kann der Nutzer deshalb nicht von diesem Vorteil profitieren, da er den Bildschirm meistens nicht sieht. Benötigt wird eine vom Algorithmus entkoppelte und portable Visualisierung, die eine Interaktion erlaubt.

Die Arbeit löst die beiden Probleme in zwei Schritten [Frie13], [Hala13]:

1. Erweiterung des Aufnahmevolumens durch Anpassung des Algorithmus: Als Basis zur Berechnung des Oberflächenmodells wurde das Verfahren nach Whelan ausgewählt. Sein Ansatz berücksichtigt und minimiert die Verzerrung über die gemessene Strecke [Whel12]. Dies ist für große Umgebungen besonders relevant. Die Arbeit hat diesen Ansatz für die vorliegende Problemstellung erweitert. Der Algorithmus berechnet die Position der Kamera innerhalb des Aufnahmewürfels. Kommt die Kamera in die Nähe einer Würfelkante (die Werte sind einstellbar), so speichert der Algorithmus die Geometrieinformationen, die am weitesten von der Kamera entfernt sind, auf die Festplatte. Ein neuer Bereich in Richtung der Kamerabewegung wird aufgenommen (Abbildung 4-14). Dies geschieht während der

Aufnahme im Hintergrund. Dadurch ist keine Aufnahmepause an den Grenzen des Aufnahmewürfels notwendig.

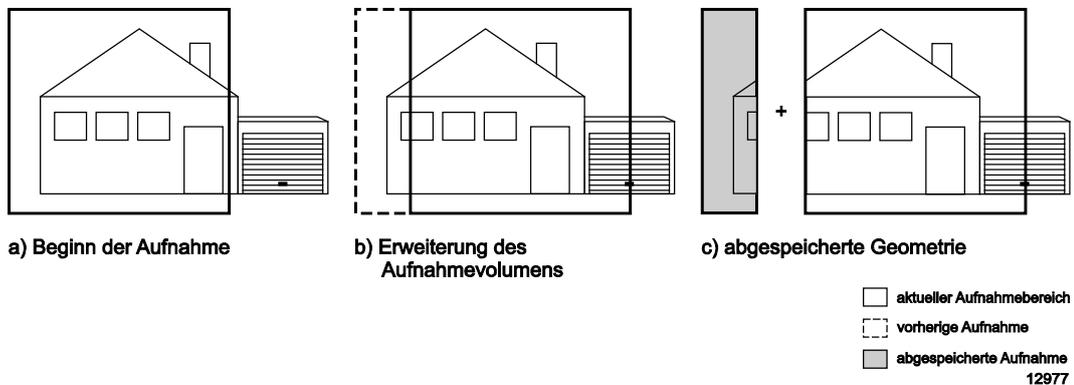


Abbildung 4-14: Erweiterung des maximalen Aufnahmevolumens

Für eine Anwendung bei komplexen Investitionsgütern hat sich gezeigt, dass eine Verschiebung des Würfels in nur eine definierte Richtung sinnvoll ist. Der Benutzer legt dazu fest, in welche Richtung diese Verschiebung erfolgen darf und sperrt damit automatisch die anderen Achsen. Kommt er an den festgelegten Rand des Würfels in der Fortschrittsrichtung, zeigt ein visuelles Signal die bevorstehende Verschiebung an. Dies ermöglicht es dem Benutzer, im aktuellen Aufnahmewürfel zu bleiben, um fehlende Bereiche aufzunehmen und anschließend bewusst weiterzugehen.

2. Erweiterung des Aufnahmeradius durch Entkoppeln der Kamera von dem Vermessungsrechner: Diese betrifft die Mobilität des Systems, um einen Einsatz der Hardware in großen Umgebungen zu ermöglichen. Dafür müssen die Kamera, die Visualisierung und die Interaktion mit dem Algorithmus von dem Vermessungsrechner entkoppelt werden. Kabellose Verbindungen bieten die Möglichkeit, die notwendigen Daten auszutauschen. Dazu wurde eine mobile Scaneinheit (MSE) entwickelt, die aus einer 3D-Kamera, einem Tablet-Computer und einem Zusatz-Akku besteht (Abbildung 4-15). Eine Applikation (Kinect Scan Viewer – KSV) auf dem Tablet-Computer verarbeitet die Daten der 3D-Kamera und schickt diese über die WiFi-Schnittstelle an einen stationären Rechner, auf dem der Berechnungsalgorithmus läuft. Über den Tablet-Computer kann der Vermesser den Aufnahmefortschritt verfolgen und Befehle an den Algorithmus verschicken. Letztere sind Befehle zum Speichern, Beenden, Neustarten und Definieren der Bewegungsrichtung des Aufnahmewürfels. Der Zusatz-Akku ist für die Stromversorgung der Kamera notwendig. Damit kann sich der Vermesser frei in der Umgebung bewegen und große Volumina aufnehmen.

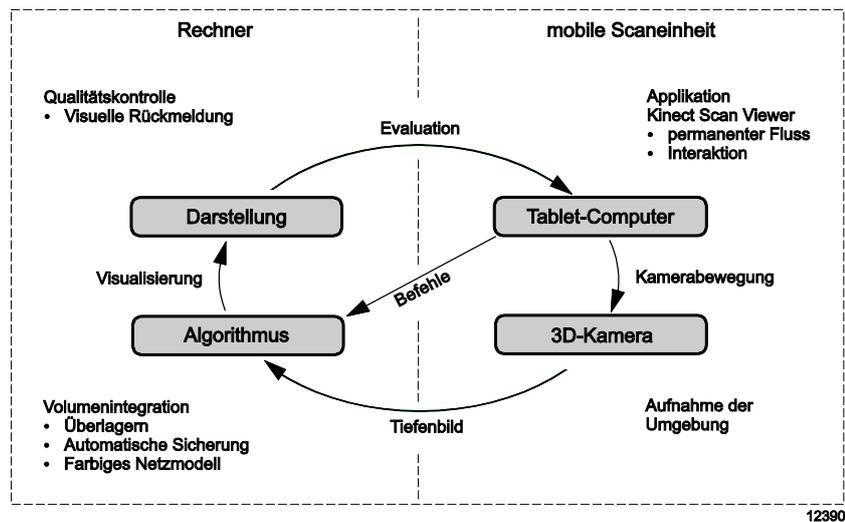


Abbildung 4-15: Entkoppelte Rechner- und Aufnahmeeinheit [Frie13]

Untersuchungen haben gezeigt, dass die variable Aufnahmezeit T_{var} von 3D-Kameras als näherungsweise konstant angenommen werden kann. Als praktikabel sind Messdauern um sechs Minuten sowohl in verschiedenen Versuchsumgebungen, als auch bei mehreren Praxiseinsätzen getestet worden. Das in dieser Zeit aufgenommene Volumen hängt von den Anforderungen an die Vollständigkeit ab (vgl. Abschnitt 4.2.3). Eine Limitierung des Aufnahmevolumens führt dazu, dass der Vermesser die Oberflächenmodelle später zusammensetzen muss. Weitere Entwicklungen der Software können diesen Schritt bei der Vermessung berücksichtigen und den zusätzlichen Aufwand einsparen.

Die variable Dauer einer Messung mit 3D-Kameras ($T_{var, 3D}$, Gl. 7) ergibt sich aus der Netto-Scanzeit einer Messung (T_S). Für die Abschätzung des Aufwands (vgl. Abschnitt 4.2.3) kann diese Zeit als sechs Minuten angenommen werden. Die Dauer der Farbaufnahmen (T_F) ist null, da die 3D-Kamera Farbinformationen durch die integrierte RGB-Kamera parallel aufnimmt. Die mittlere Umbauzeit (T_U) kann vernachlässigt werden, da der Vermesser nach einer Messung direkt eine neue Messung beginnen kann. Ein Umbau wie bei Laserscannern ist nicht notwendig.

Die Arbeit hat das entwickelte Verfahren in mehreren Praxisumgebungen zur Geometrieerfassung komplexer Investitionsgüter untersucht. Der Einsatz des Verfahrens hat sich besonders in abgeschlossenen Räumen mit einer durchschnittlichen Deckenhöhe von 2,5 Metern und als mittelgroß eingestuft Bauteilen bewährt. Dazu gehören bspw. Pumpenräume, Maschinenräume, o. ä.. Sehr große, offene Umgebungen mit einem geringen Verbaustatus, häufig als AOI-Bereich 2 oder 3 eingestuft, sind für die Aufnahmen mit 3D-Kameras ungeeignet. Die Aufnahmen sind aufgrund mangelnder Objekte im Sichtbereich der Kamera häufig fehlerhaft

und müssen wiederholt werden. Weitere Entwicklungen der Hardware können das Problem in Zukunft lösen.

Auswertung

Die Arbeit hat die Einflussfaktoren systematisch untersucht (s.o.) und dabei die Praxistauglichkeit der unterschiedlichen Verfahren nachgewiesen. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass terrestrisches Laserscanning das Spektrum der verschiedenen Aufnahmen am besten abdeckt und sehr gute Ergebnisse erzielt. Die Vermessung komplexer Investitionsgüter mit 3D-Kameras ist nicht so universell einsetzbar, für einige Anwendungsfälle jedoch sehr gut geeignet. Die Vermessung mit der Photogrammetrie liefert nicht ausreichend Messwerte und ist für eine vollständige Vermessung nicht geeignet, jedoch für die Verifikation von Plänen oder Aufnahme einzelner Maße. Abbildung 4-16 stellt die Eigenschaften zusammengefasst dar.

	Photogrammetrie	Laserscanning	3D-Kamera
Input	Kamera	Spezialistenwissen	Spezialistenwissen
	Anleitung	Laserscanner	Low-Cost-Geräte
Output	Bilder	(Farbige) Punktwolke	Farbiges Oberflächenmodell
	Einzelne Maße		Punktwolke
Qualität	±1mm (Markerebene)	±3mm	±10mm
	Orthogonale Ebenen nicht definiert		

12922

Abbildung 4-16: Vergleich der Ergebnisse von Aufnahmetechnologien

Der Vergleich der unterschiedlichen Aufnahmetechnologien und die Aufwandsabschätzung der Aufnahmen beantworten damit die Frage „Welche Technologie eignet sich zur Geometrieerfassung?“ (vgl. Abschnitt 2.4.1).

4.3 Reverse Engineering

4.3.1 Erzeugung des Planungsmodells

Der letzte Teilschritt der Datenaufbereitung ist das Reverse Engineering. Das Ziel ist es, die gemessenen Rohdaten in eine sinnvolle Planungsgrundlage zu konvertieren. Dieser Hauptschritt ist von der Aufnahme der Ist-Geometrie aus zwei Gründen getrennt:

- Die Aufbereitung der Rohdaten verläuft komplett unabhängig vom Vermessungsvorgang.
- Die in der Initialisierung gewonnenen Erkenntnisse erweitern die Daten.

Der Generalauftragnehmer plant in die hier erzeugte Planungsgrundlage die Komponenten, konstruiert Veränderungen an der Struktur und führt Montageplanungen durch. Dafür ist ein 3D-Modell erforderlich. Um das zu erhalten, teilt die Arbeit den Prozessschritt in drei Detailschritte: Nach der Rohdatenaufbereitung folgt die Konvertierung in ein 3D-Modell und Nachbearbeitung des 3D-Modells (s. Abbildung 4-17). Die Konvertierung ist für die grundsätzliche Erstellung des 3D-Modells und die Nachbearbeitung für die Anreicherung des Modells mit zusätzlichen Informationen notwendig.

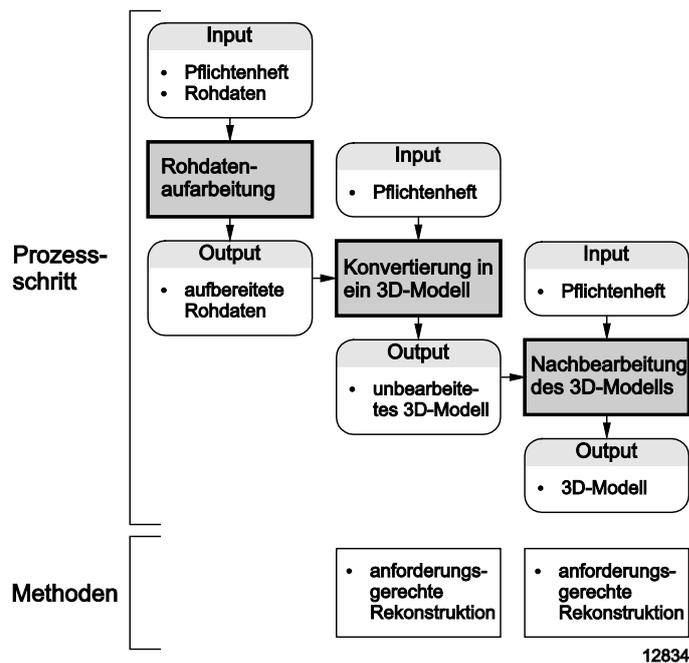


Abbildung 4-17: Reverse Engineering

Häufig bieten die Vermesser das Reverse Engineering als Dienstleistung an. Die Arbeit verwendet deshalb an dieser Stelle die Begriffe Vermesser und Vermessungsdienstleister. Die Konzepte und Methoden sind jedoch ebenfalls für den Generalauftragnehmer gültig.

Rohdatenaufbereitung

Das Ziel der Rohdatenaufbereitung ist es, konsistente und gefilterte Messwerte bereitzustellen. Bei einer manuellen Vermessung entfällt dieser Schritt. Der Vermessungsdienstleister erfüllt an dieser Stelle zwei Aufgaben: Zunächst selektiert er die verwendbaren Daten. Bei der Photogrammetrie sind das die scharfen Bilder, beim Laserscanning alle nicht fehlerhaften Punkte. Zudem fügt der Vermesser die Daten in einem Koordinatensystem zusammen, er referenziert sie. Einzelne Aufnahmen

kann er unabhängig von der Technologie später nicht verwenden. Zu jeder Technologie existieren Standardwerkzeuge, die den Benutzer bei diesem Schritt unterstützen [Kers12][Ster07].

Konvertierung in ein 3D-Modell

Der Vermesser erzeugt aus den aufbereiteten Rohdaten ein 3D-Modell. Dafür stehen ihm unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Die eingesetzte Technologie beeinflusst die Wahl der Konvertierungsmethode. Diese erfolgt entweder manuell (nachkonstruieren) oder teilautomatisiert (Vermaschung, Erkennung vordefinierter Standardbauteile). Das Ergebnis ist ein zusammenhängendes 3D-Modell.

Algorithmen zur teilautomatisierten Konvertierung liefern häufig nicht ausreichende Ergebnisse (vgl. Abschnitt 2.4.1). Eine manuelle Nachkonstruktion der fehlenden Bereiche ist daher häufig notwendig. Das ist allerdings ein sehr aufwändiger Prozess und erfordert Vorgaben des Generalauftragnehmers, was und in welcher Qualität nachkonstruiert werden soll. Die Arbeit entwickelt eine Methode zur anforderungsgerechten Rekonstruktion, die den Generalauftragnehmer dabei unterstützt, diese Vorgaben systematisch zu definieren.

Nachbearbeitung des 3D-Modells

Die Nachbearbeitung liefert ein fertiges 3D-Modell, das der Generalauftragnehmer für die weitere Planung verwenden kann. Um dieses anschließend produktiv einsetzen zu können, muss der Vermessungsdienstleister die Geometrie strukturieren und um Metainformationen erweitern. Dafür gliedert er die Modelle in einem Konstruktionsbaum, gruppiert und sortiert sie. Die aus teilautomatisierten Rekonstruktionsverfahren erhaltenen Modelle muss er vorher separieren, um einzelne Bauteile zu erhalten. Zudem fügt der Vermesser die benötigten Metainformationen wie Nennweiten von Rohren oder das durchfließende Medium in das Modell ein.

Die geforderte Nachbearbeitung erfolgt in der Regel manuell und ist wie die vorangegangene Konvertierung sehr aufwendig. Dies muss die Methode zur anforderungsgerechten Rekonstruktion berücksichtigen. Dafür muss sie die notwendigen Nachbearbeitungen und Verknüpfungen zwischen Geometrie- und Metadaten definieren.

Am Ende der Datenaufbereitungsphase liegt ein vollständiges 3D-Modell vor. Damit sind alle benötigten Informationen für die weitere Planung vorhanden. Der Generalauftragnehmer ist nun in der Lage, das Angebot zu erarbeiten.

4.3.2 Methode zur anforderungsgerechten Rekonstruktion

Unabhängig davon, ob der Generalauftragnehmer die Rekonstruktion und die Nachbearbeitung selber vornimmt oder an den Vermessungsdienstleister abgibt, muss er die Anforderungen an das Planungsmodell genau definieren, um den Aufwand für diese zeitintensiven Tätigkeiten zu minimieren. Die Methode zur anforderungsgerechten Rekonstruktion unterstützt ihn dabei. Sie stellt ein für die Problemstellung entwickeltes Lastenheft zur Verfügung. Das Lastenheft ist die Basis für alle Tätigkeiten zur Erzeugung des Planungsmodells.

Der Aufbau des Lastenhefts orientiert sich an der Definition nach DIN 69901-5 (Projektmanagement – Projektmanagementsysteme) und enthält Standardeinträge wie die Einführung und die Beschreibung der Ausgangssituation. Der wichtigste Punkt ist die Beschreibung des Soll-Zustands. Die vorher festgelegten AOI-Bereiche (vgl. Abschnitt 4.2.2) definieren unterschiedliche Anforderungen an den Soll-Zustand. Um eine Übersicht und einen Vergleich der Bereiche zu gewährleisten, definiert die Arbeit für den Soll-Zustand drei Anforderungsniveaus in einem Lastenheft, die an die AOI-Bereiche angelehnt sind. Abbildung 4-18 stellt den durch die Arbeit erweiterten Ausschnitt des Lastenhefts dar. Der Generalauftragnehmer legt die Qualität der Nachkonstruktion für jeden Bereich fest. Der Aufwand resultiert aus dieser Definition. In dem dargestellten Beispiel benötigt der Generalauftragnehmer 3D-Modelle aller Bereichskategorien, jedoch in unterschiedlichen Ausprägungen. Während im AOI-Bereich 1 alle Bauteile außer Kräne nachkonstruiert werden sollen, besteht Bereich 3 nur aus Decken, Böden und Wänden. Die Ausrüstung bzw. Ausstattung der Räume soll im dritten Bereich nicht nachkonstruiert werden. Über die Angaben zum kleinsten Durchmesser oder der kleinsten Bauteilgröße kann der Generalauftragnehmer steuern, welche Bauteile generell erforderlich sind.

Das Lastenheft schafft eine Grundlage, um die Frage „Wie verarbeitet man die Daten weiter?“ zu beantworten (vgl. Abschnitt 2.4.1).

4 Datenaufbereitung

Lastenheft 3D-Modelle						
Datenformat:	<input type="checkbox"/>	.stp		<input type="checkbox"/>	.jt	
	<input checked="" type="checkbox"/>	.dgn		<input type="checkbox"/>	.CATProduct	
	<input type="checkbox"/>	.dwg		<input type="checkbox"/>	.asm	
	<input type="checkbox"/>	Sonstiges:				
Fertigstellungsdatum:	10.04.2014					
Bereichseinteilung:	s. Anhänge					
Definition Bereiche (AOI):	3 Stufen			AOI Bereich I	AOI Bereich II	AOI Bereich III
		Farbcode				
		3D-Modell		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Decken		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Böden		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Wände		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Träger		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Rohre	DN 50	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			kleinster Durchmesser	5 mm	20 mm	50 mm
		kleinste Bauteilgröße		0,2 m	0,5 m	1 m
		elektrische Leitungen		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		spezielle Bauteile				
			Schaltschränke	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Leitern	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Geländer	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Plattformen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			spezielles Rohrsystem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Rohrhalterungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Feuerlöscher	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Kran	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		erforderliche Bauteilkomplexität				
				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
				<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Strukturbaum	<input checked="" type="checkbox"/>	Bauteilebene		<input type="checkbox"/>	Baugruppenebene	
Kommentare:	Modellstruktur nach Baumebenen aufbauen					

12894

Abbildung 4-18: Ausschnitt eines bereichsorientierten Lastenhefts zur Rekonstruktion von 3D-Modellen

5 Lösungsfindung

Nach Abschluss der Datenaufbereitung erarbeitet der Generalauftragnehmer das Lösungskonzept auf der erzeugten Planungsgrundlage. An dieser Stelle legt er die Qualität der Lösung fest. Fehler führen zu Nacharbeit und Komplikationen während der Umbauphase. Das Ziel ist es, das vom Kunden geforderte Umbauprojekt auszulegen, zu planen und zu berechnen. Dafür teilt sich der Schritt in einen technischen Abschnitt (Variantenplanung und -bewertung – 5.1) und einen wirtschaftlichen Abschnitt (Organisation und Kalkulation – 5.2).

Wie bereits in Kapitel 4, leiten die Abschnitte zunächst das konzeptionelle Vorgehen der einzelnen Schritte her, sowie deren Eingangs- und Ausgangsgrößen. Anschließend entwickelt die Arbeit wesentliche Methoden und Werkzeuge, die das Vorgehen unterstützen, die definierten Anforderungen zu erfüllen.

5.1 Variantenplanung und -bewertung

5.1.1 Engineering

Der Prozessschritt Variantenplanung und -bewertung befasst sich mit der Integration der neuen Komponenten (Position) und der Planung der technischen Umsetzung (Montagepfad). Das Ergebnis ist das Umsetzungskonzept. Dafür definiert die Arbeit vier Schritte (s. Abbildung 5-1):

- Variantenbestimmung
- Auslegung und Konstruktion
- Leistungsbeschreibung
- Erstellung der Spezifikation

Neben der Integration der Komponenten in das vorhandene Produkt sind Hilfsgeometrien, wie Anschlussrohre, Fundamente oder Halterungen zu planen und zu konstruieren.

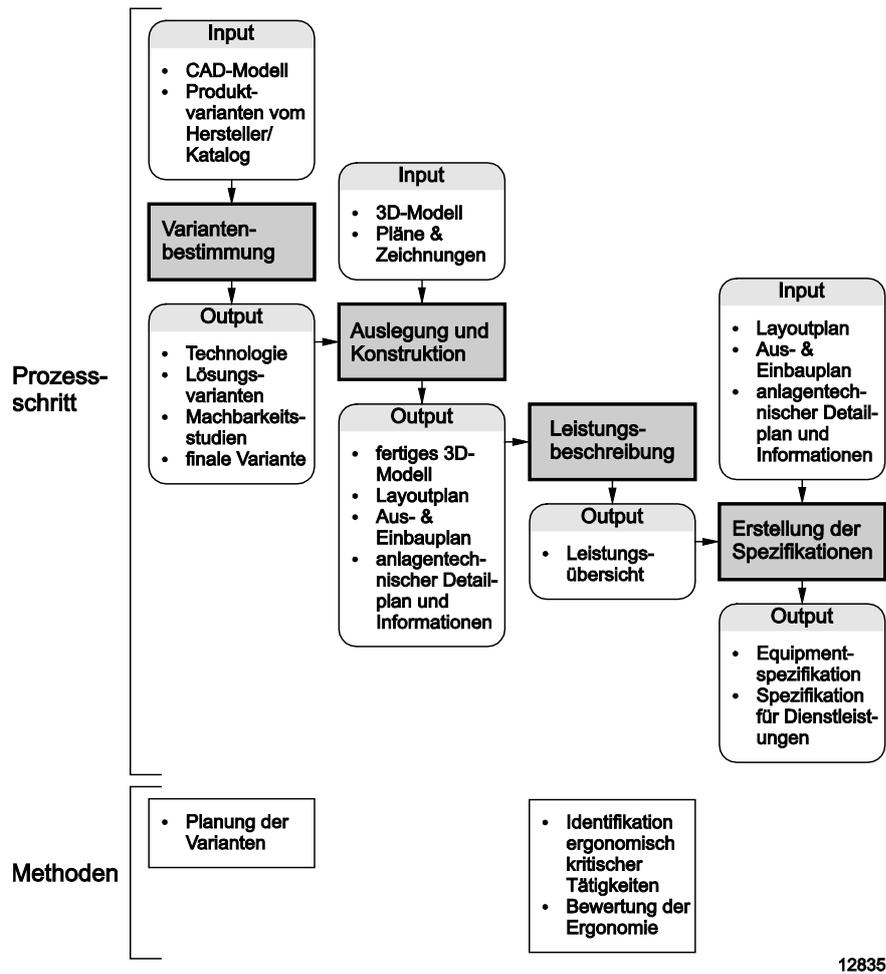


Abbildung 5-1: Variantenplanung und -bewertung

Variantenbestimmung

Die Variantenbestimmung dient der Entwicklung und Auswahl von Lösungen. Eine Lösung besteht dabei aus der Technologie und der Integration dieser Technologie in das vorhandene Objekt. Bei den in dieser Arbeit betrachteten Umbaumaßnahmen steht die Technologie häufig bereits bei der Anfrage des Kunden fest. Dies ist durch den hohen Individualisierungsgrad der Lösungen bedingt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Der Generalauftragnehmer kann einzelne Veränderungen vornehmen und die Technologie somit für die jeweilige Umbaumaßnahme anpassen. Soll bspw. ein Filtersystem nachgerüstet werden, so kann der Generalauftragnehmer die Maße in einem bestimmten Rahmen skalieren, um das System an die Umgebung anzupassen.

Die wesentliche Herausforderung bei der Variantenbestimmung ist die Integration der Technologie in das vorhandene Objekt. Der Generalauftragnehmer entwickelt

zunächst unterschiedliche Lösungsalternativen. Sie beinhalten neben der Einbauposition und -orientierung zusätzlich den Einbaupfad. Letzterer ist bereits im Angebot notwendig, um einen Anstieg der Kosten in der Umbauphase durch Nacharbeiten oder zusätzliche Arbeiten zu vermeiden.

Der Generalauftragnehmer plant die Position und Orientierung in der Regel mit CAD-Werkzeugen. Die Planung des Einbaupfads ist mit CAD als aufwendig einzustufen, da Teileanimationen und unterschiedliche Montagepfade nur sehr umständlich mit diesen Werkzeugen darstellbar sind. Dafür greifen einige Unternehmen zusätzlich auf Simulations- oder Virtual-Reality-Lösungen zurück.

Als weiteres Problem wurde die objektive Auswahl der besten Lösung identifiziert. Der Generalauftragnehmer kennt zwar die Umgebung, allerdings nicht zwingenderweise die Abläufe des Betreibers. Eine Auswahl der finalen Variante sollte daher in der Regel in Abstimmung mit dem Kunden anhand neutraler Kriterien erfolgen. Dafür unterstützt die Methode zur Planung der Varianten den Generalauftragnehmer bei der gemeinsamen Auswahl und Anpassung der Lösung mit dem Kunden. Zusätzlich ermöglicht die Methode die Planung der Einbaupfade. Das Ergebnis des Teilschritts ist das Umsetzungskonzept. Es besteht aus dem Layout und einer möglichen Einbaustrategie.

Auslegung und Konstruktion

Die Auslegung und Konstruktion der ausgewählten Lösungsvariante beeinflusst direkt die Qualität des Angebots. Eine detaillierte Ausarbeitung ermöglicht es, die benötigten Maßnahmen und damit den Aufwand abzuschätzen. Das Ziel des Teilschritts ist deshalb eine weitere Detaillierung und Bewertung der gewählten Variante. Der Generalauftragnehmer nimmt vorher nicht berücksichtigte Hilfsgeometrien und Systeme, wie bspw. die Elektrik, in diesem Schritt in die Konstruktion auf. Am Ende steht ein fertiges CAD-Modell mit allen Komponenten, Hilfsgeometrien und Systemen.

Leistungsbeschreibung

Im Anschluss an die Auslegung und Konstruktion erfolgt eine Beschreibung der notwendigen Leistungen. Aufbauend auf der konstruktiven Lösung plant der Generalauftragnehmer die Leistungen nach einem standardisierten Katalog. Diese Leistungsbeschreibung schafft Übersicht und Transparenz über die Leistungen im späteren Angebot. Dabei werden alle an der Umbaumaßnahme beteiligten Leistungen berücksichtigt.

Der Leistungskatalog ist unternehmensspezifisch und muss vom Generalauftragnehmer einmal für alle Leistungen aufgebaut werden. Die enthaltenen Standardleistungen gehen von einer ausreichend guten Umgebung aus und berücksichtigen

nicht direkt die vorliegenden Rahmenbedingungen am Objekt. Muss bspw. der Monteur später schweißen, dann berücksichtigt dieser Katalog nicht die Zugänglichkeit zur Schweißstelle. An dieser Stelle muss eine Absicherung der Tätigkeiten aus ergonomischer Sicht erfolgen. Die dabei entstehende Fragestellung ist: „Kann eine Person diese Tätigkeit ohne erschwerte Ausführungsbedingungen durchführen?“ Da solche Absicherungen einen Zusatzaufwand bedeuten, sollte ihre Anzahl minimiert werden. Darüber hinaus sollten Absicherungen an die Rahmenbedingungen der komplexen Investitionsgüter angepasst werden. Die Methode zur Identifikation ergonomisch kritischer Tätigkeiten unterstützt den Generalauftragnehmer dabei, die Leistungen auf Durchführbarkeit zu untersuchen und kritische Stellen aufzudecken. Die anschließende Bewertung der Ergonomie stellt Werkzeuge für die aufwandsarme Absicherung von kritischen Montagetätigkeiten zur Verfügung. Identifiziert der Generalauftragnehmer dabei größere Schwierigkeiten, kann er die Probleme konstruktiv lösen, bspw. durch Hinzufügen einer Plattform, um für eine bessere Zugänglichkeit zu sorgen, und diesen Mehraufwand bereits im Angebot berücksichtigen.

Erstellung der Spezifikation

Der Generalauftragnehmer trägt zwar die Verantwortung für das gesamte Umbauprojekt, vergibt allerdings oft einzelne Teilschritte an externe Unternehmen. Dafür muss er die Spezifikationen anhand der Pläne und Modelle erstellen. Sie beinhalten Komponentenspezifikationen sowie Spezifikationen für die erforderlichen Dienstleistungen. Sie sind der wesentliche Input für die Teilangebote der externen Unternehmen.

Die vier Teilschritte der Variantenplanung und -bewertung sind für jedes Angebot relevant. Lediglich die Erstellung der Spezifikation kann bei einer kompletten Bearbeitung der Umbaumaßnahmen und Herstellung der neuen Komponenten durch den Generalauftragnehmer auf die kritischen Punkte beschränkt werden.

5.1.2 Planung der Varianten

Der Generalauftragnehmer entwickelt unterschiedliche Lösungen für das System. Die Arbeit identifiziert die Auswahl der bestmöglichen Lösung als wesentliche Herausforderung. Der Generalauftragnehmer kennt die neuen zu verbauenden Systeme und besitzt Kenntnis über das vorhandene Objekt. Informationen über den täglichen Betrieb und Arbeitsabläufe liegen dem Generalauftragnehmer in der Regel jedoch nicht vor. In die Auswahl der Lösung sollte daher der Kunde oder Betreiber integriert werden. Mit den konventionellen Methoden (Papierzeichnungen, CAD) führt dies allerdings häufig zu Verständnisproblemen, so dass der Kunde den Generalauftragnehmer nicht in dem erforderlichen Maße unterstützen kann (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Als weitere Herausforderung identifiziert die Arbeit die Planung der Montageschritte. Der Aufwand, die Montageschritte für alle möglichen Lösungsvarianten durchzuplanen, ist sehr hoch und erfordert den Einsatz weiterer Werkzeuge. In den Diskussionen müssten modifizierte oder neu angelegte Varianten nachträglich auf die Montierbarkeit untersucht werden, bevor eine Entscheidung über die finale Lösung getroffen werden kann. Dieser Weg ist nicht praktikabel und der Generalauftragnehmer benötigt eine Möglichkeit, die Montageschritte aufwandsarm und möglichst mit allen vorhandenen Rahmenbedingungen planen zu können.

Die beiden Probleme erfordern eine Methode, die den Generalauftragnehmer dabei unterstützt, die Lösungsalternativen um die Einbausituation zu erweitern und den Kunden in die Entscheidungsfindung zu integrieren. Das Ziel dieser Methode ist es daher, eine Plattform für die aufwandsarme Planung und Vermittlung der Lösungen bereitzustellen.

Die Arbeit verwendet hierfür die Augmented-Reality-Technologie, da sie sehr gut als Kommunikationsplattform zwischen dem Kunden und Generalauftragnehmer geeignet ist und verschiedene Möglichkeiten zur Interaktion liefert (vgl. Abschnitt 4.1.3). Sie eignet sich ebenfalls für die Planung der Montagepfade, da sie mit einer Software direkt am Objekt durchgeführt werden und der Generalauftragnehmer damit die tatsächlich vorliegenden Rahmenbedingungen berücksichtigen kann.

Als Hardware wurden wiederum Tablet-Computer ausgewählt, weil sie sich für die Betrachtung mit mehreren Teilnehmern (Generalauftragnehmer und Kunde) eignen. Die Software erweitert die beschriebene Visualisierung von Standardkomponenten. Die Visualisierung von Standardkomponenten wird im Folgenden als AR-Standard bezeichnet und die Planung der Varianten AR-Variantenplanung genannt. Abbildung 5-2 stellt den schematischen Aufbau der entwickelten Module dar.

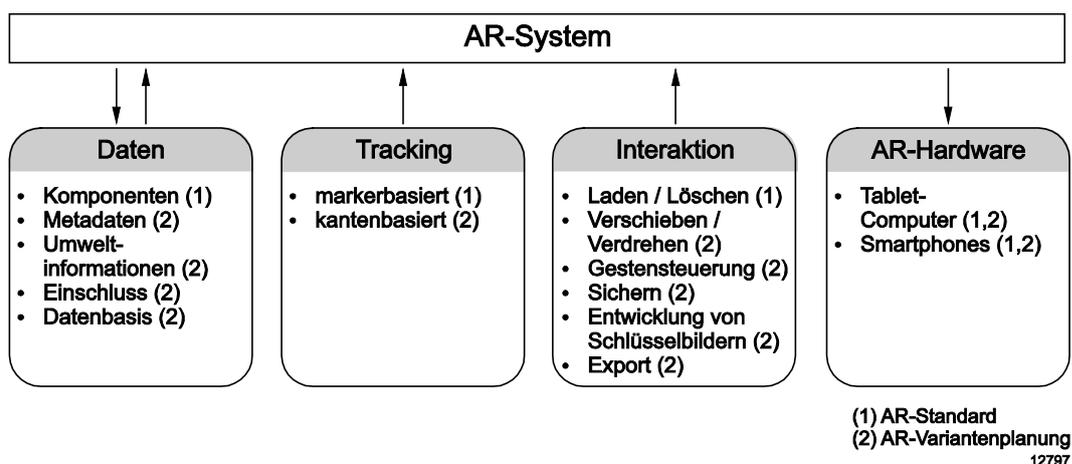


Abbildung 5-2: Schematischer Aufbau des entwickelten AR-Systems

5 Lösungsfindung

Die vorliegende Datenbasis, bestehend aus der Geometrie, Umgebungsinformationen und den richtig platzierten Komponenten, ermöglicht eine genaue und realitätsnahe Visualisierung der neuen Situation. Dafür implementiert die Arbeit ein hybrides Trackingverfahren, bestehend aus einem kantenbasierten Ansatz für die Initialisierung des Systems und einem featurebasierten Ansatz für die anschließende Orientierung (vgl. Abschnitt 2.4.3). Das zu dem Zeitpunkt hinterlegte Kantenmodell leitet der Generalauftragnehmer mit einer Software aus dem 3D-Modell der Umgebung ab. Das AR-System orientiert sich durch den Vergleich des Kantenmodells mit der realen Umgebung.

Das AR-System ordnet alle Komponenten geometrisch korrekt an, um Fehlinterpretationen des Kunden zu verhindern (Abbildung 5-3). Es berücksichtigt die Umgebungsinformationen und blendet – anders als bei der Visualisierung der Standardkomponenten – nur den sichtbaren Teil der Geometrie an der richtigen Stelle ein (vgl. Abschnitt 4.1.3, Abbildung 4-3). Ein weiterer Vorteil des Trackings ist der frei wählbare Betrachtungswinkel. Nach der Initialisierung des Systems kann der Benutzer um Objekte herumgehen und die Szene aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten.

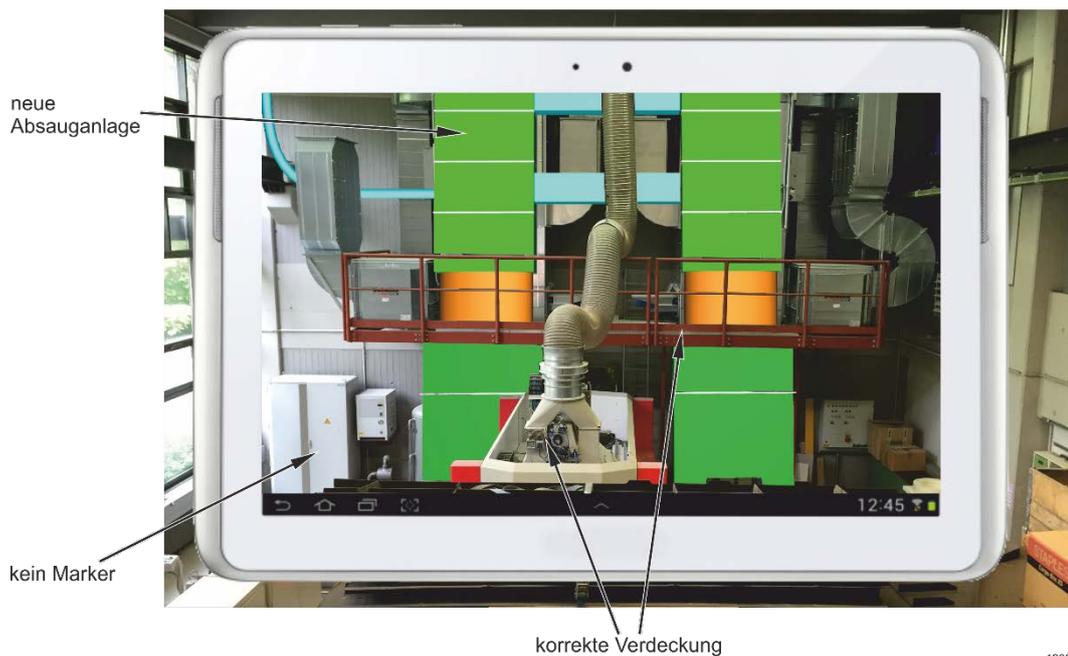


Abbildung 5-3: AR-Variantenplanung [Tito15]

Um die beschriebene Funktionalität zu ermöglichen, erzeugt der Generalauftragnehmer die Modelle für das Tracking und richtet die Komponenten daran aus. Zusätzlich kann er die Geometriemodelle um Metadaten wie Nenndurchmesser von Rohren oder Flussrichtungen von Fluiden ergänzen.

Um die Anregungen des Kunden direkt umzusetzen und Montagepfade generieren zu können, muss das System eine Schnittstelle zur Interaktion bereitstellen. Dazu kann die berührungsempfindliche Oberfläche der Tablet-Computer genutzt werden. Darüber kann der Generalauftragnehmer Eingaben machen. Die Bildschirmtastatur reicht für eine Interaktion mit den Komponenten nicht aus, da das Eintippen einzelner Befehle zum Manipulieren einer 3D-Geometrie mühsam und wenig intuitiv ist. Deswegen wurde eine Gestensteuerung implementiert, die eine Interaktion mit den Bauteilen ermöglicht. Der Benutzer wählt zunächst eine oder mehrere Komponenten aus der Bauteilliste aus. Bei einer Auswahl mehrerer Teile manipuliert der Benutzer den gesamten Verbund. Das System erlaubt die Transformation und Rotation in allen sechs Freiheitsgraden. Durch Wischbewegungen mit zwei Fingern verschiebt der Benutzer die ausgewählten Modelle in eine Richtung. Durch Rotationsbewegungen mit zwei Fingern verdreht er die Modelle. Ein Skalieren der Bauteile ist dabei deaktiviert, um eine zufällige Veränderung der Modelle zu vermeiden.

Um den Aufwand der Manipulation zu reduzieren, erfolgt die Translation und Rotation in festgelegten Intervallen. Mehrere Untersuchungen mit potentiellen Anwendern zeigten, dass Werte von 100 mm für die Translation und 45° für die Rotation praktikabel sind. Die AR-Variantenplanung stellt dem Benutzer zusätzlich ein Konfigurationsmenü für die Anpassung dieser Werte zur Verfügung.

Die neu erzeugten oder manipulierten Lösungen muss der Generalauftragnehmer dokumentieren können. Zudem muss er dem Kunden die unterschiedlichen Varianten, auch die vor Ort neu erarbeiteten, bei Bedarf visualisieren können. Dafür kann der Nutzer die unterschiedlichen Lösungen speichern und laden. Das System stellt dem Generalauftragnehmer zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Das Abspeichern von Posen und das Speichern von Konfigurationen. In einer Pose speichert das System die Koordinaten und die Ausrichtung der Komponenten. Der Generalauftragnehmer kann unterschiedliche Varianten einer Umbaumaßnahme mit den gleichen Komponenten über die Posen darstellen. Ein Beispiel ist die Modifikation einer Lösung vor Ort mit dem Kunden. Eine Konfiguration enthält mehrere Posen, die verwendeten Geometriemodelle und die Trackingkonfiguration sowie bestimmte Eigenschaften wie die Sichtbarkeit oder die Transparenz. Dies ermöglicht eine Neuplanung einer Lösung.

Ein Ziel des Generalauftragnehmers ist es, die Lösungsvarianten umfassend zu bewerten. Dafür muss er neben den Varianten der Einbaupositionen die Ein- bzw. Ausbaupfade betrachten können. Das AR-System ermöglicht dafür eine rudimentäre Planung der Ein- und Ausbaupfade direkt am Objekt. Dafür speichert es bei Bedarf die Manipulationen in der ausgeführten Reihenfolge. Der Generalauftragnehmer kann eine Komponente von unterschiedlichen Orten zum Verbauort bewegen und diese Bewegungen abspeichern. Die erzeugten Varianten der Montagepfade sichert das System in der Konfiguration ab.

In der AR-Variantenplanung kann der Generalauftragnehmer mit den Komponenten interagieren und die Lage und Ausrichtung sowie die Systemzusammensetzung verändern. Eine Manipulation der Modelle ist allerdings ausgeschlossen und die Geometrie bleibt unverändert. Die Verbindung zwischen den generierten Daten und der Geometrie besteht über den eindeutigen Namen der Geometriedaten. Dies ermöglicht die parallele Konstruktion der Bauteile während der beschriebenen Variantenplanung vor Ort. Die dabei dokumentierten Konfigurationen benötigt der Generalauftragnehmer für die anschließende Auslegung und Konstruktion in seinen Planungswerkzeugen. Das AR-System stellt dafür eine Exportfunktion der Konfigurationen zur Verfügung. Eine Konfiguration enthält mehrere Varianten. Jede dieser Varianten besteht aus den Positionen der Teile, eventuell vorhandenen Animationen und weiteren Attributen wie Sichtbarkeit und Transparenz der Teile. Das AR-System speichert die erzeugten Daten in einem neutralen Format und ermöglicht dadurch eine Weiterverwendung. Abbildung 5-4 stellt das Konzept des Datenaustauschs zwischen der Variantenplanung und einer weiterführenden Planungssoftware dar. Diese Planungssoftware kann bspw. eine Simulations- oder VR-Software sein.

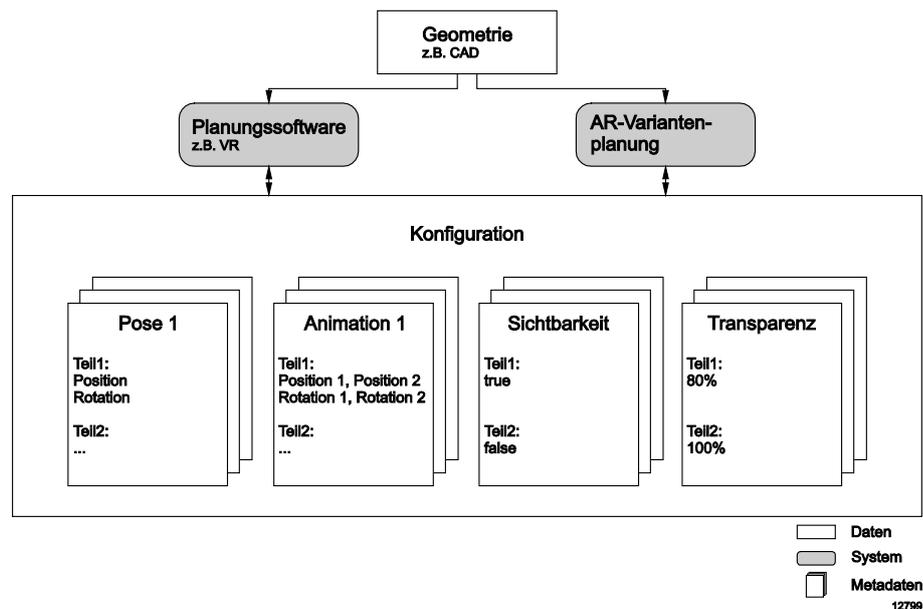


Abbildung 5-4: Datenaustausch zwischen der Variantenplanung und einer Planungssoftware

5.1.3 Identifikation ergonomisch kritischer Tätigkeiten

Der Generalauftragnehmer konstruiert und plant die Umbaumaßnahmen basierend auf den Ergebnissen der Variantenplanung. Anschließend leitet er alle für den Umbau relevanten Tätigkeiten ab. Der daraus resultierende Katalog beinhaltet Leistungen wie Schweißen, Gerüst aufbauen oder logistische Tätigkeiten und die dafür be-

nötigten Zeiten. In Kombination mit dem Geometriemodell sind die Umbaumaßnahmen damit genau definiert. Dieser Tätigkeitskatalog bestimmt maßgeblich die im Angebot ausgewiesenen Leistungen. Beim späteren Umbau fallen häufig weitere, nicht berücksichtigte Tätigkeiten an, wie ein weiteres Gerüst aufzubauen oder ein zusätzliches Bauteil zu entfernen, weil der Werker nicht an die nötige Stelle herankommt. Diese Tätigkeiten ergeben sich durch eine mangelhafte Absicherung der Lösung. Eine Betrachtung der Lösung aus ergonomischer Sicht ist daher bereits in der Angebotserstellung notwendig.

Um den Aufwand einer solchen Absicherung in der Angebotsphase zu minimieren, leitet die Arbeit eine Methode ab, um ergonomisch kritische Tätigkeiten zu identifizieren. Diese soll einschätzen, ob die geplanten Tätigkeiten kritisch sind und damit weitere Maßnahmen erfordern oder voraussichtlich problemlos durchführbar sind. Für diese Einschätzung liegen dem Generalauftragnehmer das Geometriemodell des Objekts (Umgebung), das Geometriemodell der neuen Komponenten, die Tätigkeiten und deren Dauern vor.

Die PATH-Methode ist eine Bewertung der ergonomischen Risiken von sich nicht wiederholenden Tätigkeiten [Buch96]. Die Methode bewertet die Haltungen der Arbeiter. Der Ansatz wurde zur Arbeitsplatzanalyse im Bauwesen entwickelt. Das von der Methode abgedeckte Feld ist für die hier betrachteten Bereiche relevant und eignet sich daher für die vorliegende Problemstellung. Allerdings wurde das Verfahren für die Beobachtung von Tätigkeiten entwickelt und musste an zwei Stellen für die Verwendung bei Umbaumaßnahmen angepasst werden:

- Verwendung bei der Planung der Tätigkeiten (keine Beobachtung bereits durchgeführter Tätigkeiten).
- Berücksichtigung der Umgebung.

Um den Bewertungsaufwand zu minimieren und eine Abschätzung im Voraus zu ermöglichen limitiert die Arbeit die Bewertung auf drei Stufen: kritisch, moderat und unkritisch. Die Anzahl der unterschiedlichen Haltungen wird ebenfalls auf vorhersagbare Haltungen limitiert. Dies sind Rumpf- (R), Bein- (B) und Armhaltungen (A) (Abbildung 5-5). Aus der Summe der Einzelhaltungen (X_G) ergibt sich eine Bewertung der gesamten Haltung (H). Eine Abschätzung der Kopfhaltung ist bei der gegebenen Problemstellung kaum möglich und nicht Teil der Bewertung. Eine grafische Darstellung der Haltungsbewertung der angepassten Methode stellt Anhang C dar.

Haltung (H)	Rumpf (R)	neutral	1	R
		nicht neutral	2	
		schwer	3	
	Beine (B)	neutral	1	B
		nicht neutral	2	
		keine Stütze	3	
	Arme (A)	neutral	1	A
		gestreckt	3	
	Summe			$X_0 = R+B+A$
	Auswertung			
3-5 neutral H = 1				1 bei $X_0 = 3-5$
6-7 nicht neutral H = 2				2 bei $X_0 = 6-7$
8-9 schwer H = 3				3 bei $X_0 = 8-9$

12981

Abbildung 5-5: Bewertungsschema einer Ergonomieabschätzung (Haltungen)

Die Methode berücksichtigt die Umgebung, indem sie die Zugänglichkeit (Z) separat bewerten lässt. Der Generalauftragnehmer muss diese abschätzen und den drei Kategorien zuordnen (Abbildung 5-6). Dabei stellt keine direkte Zugänglichkeit den kritischen, eine eingeschränkte Zugänglichkeit den moderaten und eine direkte Zugänglichkeit den unkritischen Bereich dar.

Zugang (Z)	zu Fuß, stehend	1	Z
	kriechend, gestreckt	2	
	Klettergurt, Leiter	3	

12982

Abbildung 5-6: Bewertungsschema einer Ergonomieabschätzung (Zugänglichkeit)

Der dritte Faktor ist die Dauer der Tätigkeit (D) (Abbildung 5-7). Die Grenzen für die Bereiche sind abhängig von den Maßnahmen und der Branche. Der Generalauftragnehmer muss sie einmalig festlegen. Bei der Bewertung kann er dann die Dauern aus dem Katalog mit den durchzuführenden Tätigkeiten entnehmen und bewerten. Dazu sind Angaben wie Schweißmeter in eine Dauer umzurechnen oder den Bewertungsbereichen entsprechend zuzuordnen.

Dauer (D) [min]	$0 \leq 60$	1	D
	$60 \leq 180$	2	
	$180 <$	3	

12980

Abbildung 5-7: Bewertungsschema einer Ergonomieabschätzung (Dauer)

Für jede Tätigkeit sollte der Generalauftragnehmer einen solchen Bogen ausfüllen. Das Gesamtergebnis liefert eine Einstufung der Tätigkeit in die Stufen kritisch (Level I), moderat (Level II) und unkritisch (Level III). Diese Klassifizierung gibt Aufschluss darüber, ob weitere Untersuchungen notwendig sind, bzw. welches der drei Kriterien die Gesamtnote am meisten negativ beeinflusst. Häufig kann der Generalauftragnehmer viele der identifizierten Probleme aufwandsarm lösen, bspw. durch den Einsatz einer Hebebühne für eine bessere Zugänglichkeit. Als kritisch eingestufte Tätigkeiten bedürfen dagegen einer detaillierteren ergonomischen Analyse.

5.1.4 Absicherung ergonomisch kritischer Tätigkeiten

Der Generalauftragnehmer muss die Bewertungen und Absicherungen virtuell durchführen, da das fertige System nicht physisch vorliegt. Virtuelle Menschmodelle helfen ihm, die Problemstellen zu analysieren und eine Lösung zu erarbeiten. Besonders die Virtual-Reality-Technologie (VR) ermöglicht detaillierte Untersuchungen der Ergonomie in einem frühen Projektstadium (vgl. Abschnitt 2.4.2).

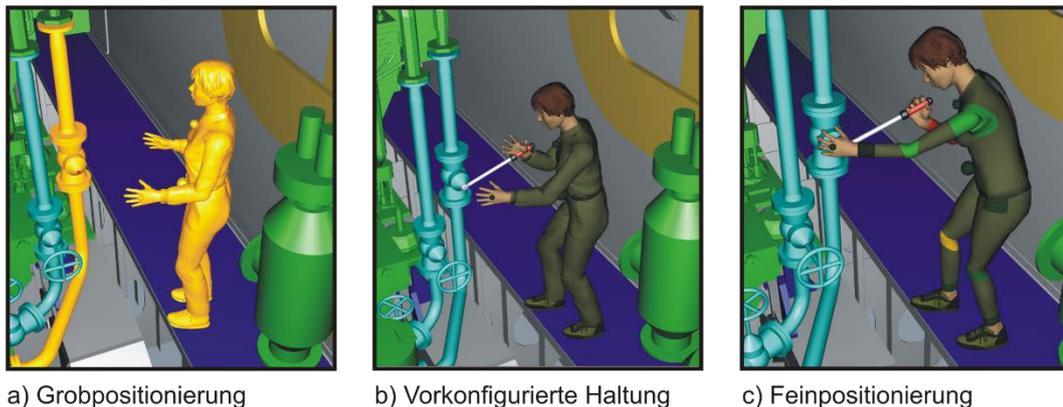
Ergonomieuntersuchungen in VR bestehen im Wesentlichen aus drei Teilen: Vorbereitung, Untersuchungsdurchführung und Dokumentation. Die Vorbereitung bereitet die Daten auf und stellt die benötigten Werkzeuge zur Verfügung. In der Durchführung findet die eigentliche Analyse statt. Der Benutzer überprüft die kritischen Stellen und dokumentiert anschließend die Probleme und die erarbeitete Lösung. Das Werkzeugset Virtual Production Toolset (ViP) ermöglicht eine aufwandsarme Vorbereitung und eine zielgerichtete Dokumentation [Hein15][Scha12].

Das größte Hindernis, virtuelle Menschmodelle einzusetzen, ist der Aufwand, sie richtig zu positionieren. Der Benutzer muss das Menschmodell an die richtige Stelle und in die richtige Haltung bringen. Vorhandene Methoden sind für einen Einsatz bei komplexen Investitionsgütern sehr aufwendig und in der Angebotserstellung nicht produktiv einsetzbar. Das Ziel der Methode ist es deshalb, eine aufwandsarme Positionierung in großen Umgebungen und eine Adaption des Menschmodells an die durchzuführende Tätigkeit zu gewährleisten. Dafür erweitert die Arbeit das ViP-Toolset.

Ein automatisiertes dreistufiges Verfahren ermöglicht die korrekte Positionierung der virtuellen Menschmodelle in der Szene [Loed12][Tito13a]:

- Grobpositionierung
- Einnahme der Körperhaltung
- Feinpositionierung

Zunächst wählt der Generalauftragnehmer den Untersuchungsort. Dieser ist durch die Identifikation ergonomisch kritischer Tätigkeiten (vgl. Abschnitt 5.1.3) bekannt. Bei der Grobpositionierung platziert das Verfahren das Menschmodell in seiner Ausgangshaltung automatisch am Untersuchungsort (Abbildung 5-8a). Für die weiteren Schritte steht dem Generalauftragnehmer eine Benutzeroberfläche zur Verfügung. Das Menü ist an die Ergonomieuntersuchung angepasst und stationär am Rechner oder über ein Tablet direkt in der virtuellen Umgebung verfügbar (Abbildung 5-9).



12101

Abbildung 5-8: Positionierung des Menschmodells

Im nächsten Schritt bringt der Generalauftragnehmer das virtuelle Menschmodell in die korrekte Haltung (Abbildung 5-8b). Da der Mensch unterschiedlich komplexe Haltungen einnehmen kann, stellt die Methode dem Generalauftragnehmer zwei Möglichkeiten zur Verfügung: ein Haltungskonfigurator und das Übertragen der eigenen Körperhaltung auf das virtuelle Menschmodell. Letzteres erfüllen viele auf dem Markt erhältliche Lösungen wie das Tracking spezieller Marker. Unterschiedliche Ansätze reduzieren den dafür benötigten Aufwand mit Hilfe neuer Ansätze wie dem Einsatz des Microsoft Kinect-Sensors [Tito13b]. Die Ergonomie-Erweiterung des ViP-Toolsets unterstützt eine Verwendung dieser Verfahren, in der Praxis hat sich diese Herangehensweise für einen Einsatz in der Angebotserstellung jedoch als zu aufwändig erwiesen.

Der Haltungskonfigurator stellt eine Erweiterung der vordefinierten Haltungen nach Nedeß dar (vgl. Abschnitt 2.4.2). Er ermöglicht es eine geeignete Haltung direkt zu konfigurieren oder häufig verwendete Haltungen auszuwählen. Für die Konfiguration wählt der Generalauftragnehmer auf dem Tablet Haltungen für einzelne Körperteile aus. Diese sind auf Rumpf, Beine und Arme beschränkt. Das deckt die üblichen Haltungskombinationen ab. Zudem sind diese Einzelhaltungen aus dem Bewertungsbogen der Identifikation ergonomisch kritischer Tätigkeiten übertragbar.

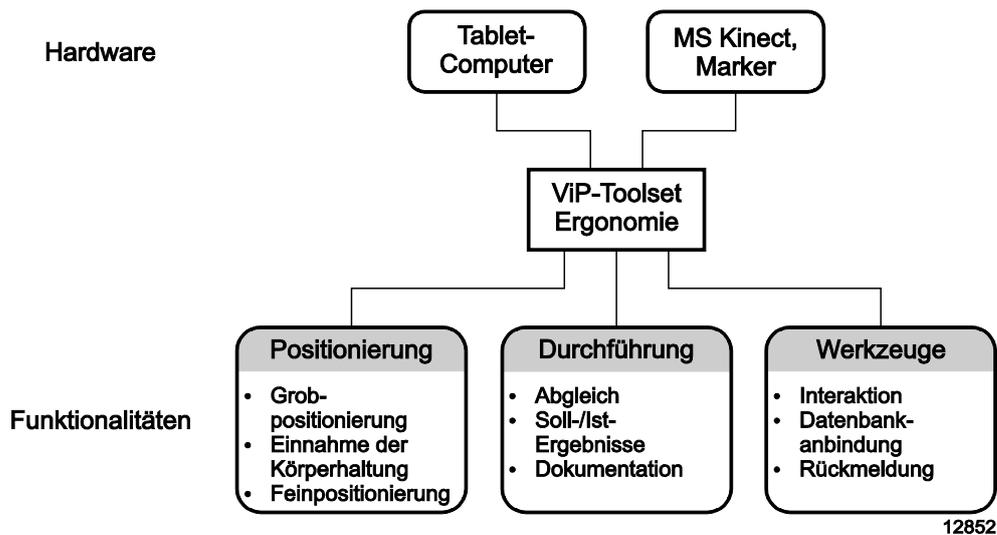


Abbildung 5-9: ViP-Toolset Ergonomie

Manche Situationen erfordern eine feinere Positionierung des virtuellen Menschmodells. Dafür erfolgt im letzten Schritt eine optionale Feinpositionierung (Abbildung 5-8c). Der Generalauftragnehmer kann manuell Anpassungen an dem Menschmodell vornehmen. Das Verfahren unterstützt ihn mit vordefinierten Bewegungen, wie bspw. das Greifen der Bauteile.

Der Generalauftragnehmer kann nach der abgeschlossenen Vorbereitung die kritische Tätigkeit analysieren. Besonders wichtig sind die zum Teil sehr hohen Gewichte der Einzelteile der komplexen Investitionsgüter. Während ein nach vorn gebeugter Mensch in einiger Entfernung von der Plattformkante einen Schraubenzieher bedienen kann, kann er vielleicht nicht ausreichend Kraft aufbringen, um einen Drehmomentschlüssel anzuziehen oder einen Kranhaken einzuhängen. Dafür stellt die Ergonomie-Erweiterung des ViP-Toolsets eine Methode bereit, um eine Machbarkeitsuntersuchung unter Berücksichtigung maximal möglicher Kräfte durchzuführen. Es koppelt dazu das virtuelle Menschmodell mit einer Datenbank mit maximal zulässigen Kraftwerten, indem es die aufzubringende Kraft in die unterschiedlichen Richtungen zerlegt und auf die einzelnen Gelenke überträgt. Die maximal zulässigen Kraftwerte können unternehmensspezifisch sein oder aus verschiedenen Standards kommen. Der Generalauftragnehmer definiert in jedem Fall die geforderte Bewegungsrichtung. In dem beschriebenen Beispiel erfolgt ein Strecken des Arms. Das Toolset gleicht die Bewegung mit der Datenbank ab und gibt eine visuelle Rückmeldung, ob diese Tätigkeit ausführbar ist.

Die Erweiterungen des ViP-Toolsets senken die gesamte Konfigurationsdauer von virtuellen Menschmodellen erheblich. Dadurch kann der Generalauftragnehmer diese bereits während der Angebotsphase für besonders kritische Vorgänge produktiv einsetzen.

5.2 Organisation & Kalkulation

Ziel des Prozessschritts ist es, die Umbaumaßnahmen organisatorisch vorzubereiten und wirtschaftlich abzusichern. Dafür ist er in die drei Teilschritte Kapazitätsbedarfsermittlung, Einholung der Angebote und Lieferterminbestimmung unterteilt (Abbildung 5-10). Diese drei Teilschritte sind in der Literatur beschrieben. Die Arbeit gliedert sie deshalb in den Prozess ein, beschreibt sie kurz und verweist auf vorhandene Verfahren. Nach Abschluss des Prozessschritts Organisation und Kalkulation ist das Angebot inhaltlich fertiggestellt.

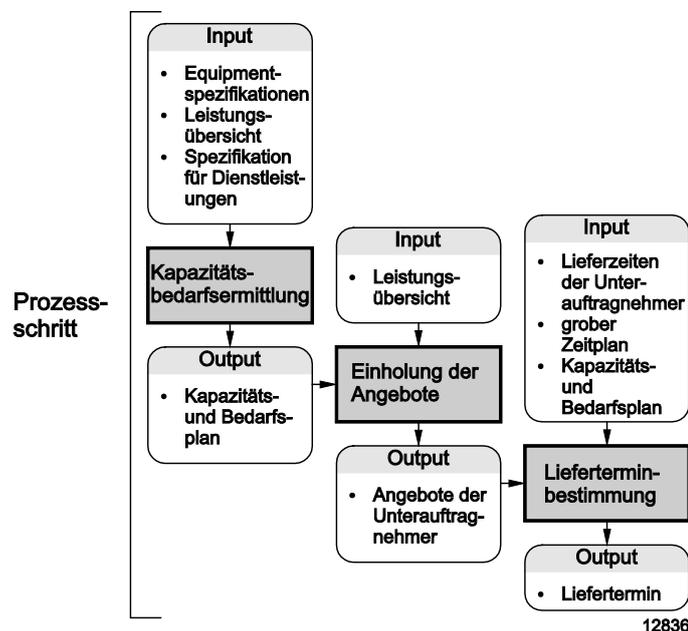


Abbildung 5-10: Organisation und Kalkulation

Kapazitätsbedarfsermittlung

Die Kapazitätsbedarfsermittlung dient der Planung der Kapazität des Generalauftragnehmers. In der Regel sind seine Kapazitäten begrenzt und häufig muss er Aufgaben an externe Unterauftragnehmer vergeben. Die Kapazitätsbedarfsermittlung ermittelt dafür aus den anstehenden und terminierten Arbeitsschritten den Kapazitätsbedarf in den Planungsperioden [Schu11]. Der Kapazitätsbedarf ergibt sich dabei aus den einzelnen Aufwänden. Die Aufwände fallen in den direkten und den indirekten Bereichen an. Für die Ermittlung der Aufwände in den direkten Bereichen setzt der Generalauftragnehmer die zuvor erstellte Leistungsübersicht ein. Für die Bewertung der indirekten Bereiche kann er auf Erfahrungen alter Projekte zurückgreifen und die Aufwände abschätzen.

Sind die notwendigen Kapazitäten bekannt, gleicht der Generalauftragnehmer diese mit seinen vorhandenen Ist-Kapazitäten ab. Aus diesem Abgleich kann er entscheiden, welche Arbeiten er selber durchführen kann und welche er an Unterauftragnehmer vergeben oder zeitlich umplanen muss [Eick14]. Das Ergebnis ist der Kapazitätsbedarfsplan.

Einholung der Angebote

In diesem Teilschritt holt sich der Generalauftragnehmer auf Basis der Leistungsübersicht und der Spezifikationen Angebote für extern zu kaufende Komponenten und Leistungen ein. In der Regel fragt der Generalauftragnehmer dafür bei verschiedenen Unterauftragnehmern ein. Abschließend wertet er die Angebote aus, trifft Entscheidungen und stellt die externen Dienstleister für das mögliche Projekt zusammen. Dieser Teilschritt erfolgt spät im Angebotserstellungsprozess, weil dafür sowohl eine ausreichende Datengrundlage als auch definierte Anforderungen vorhanden sein müssen, da die Unterauftragnehmer sonst keine verbindlichen Angebote abgeben können.

Lieferterminbestimmung

Die Lösungsfindung schließt mit der Bestimmung des Liefertermins. Diesen bestimmt der Generalauftragnehmer auf Basis des Kapazitätsbedarfs, der Lieferzeiten der Unterauftragnehmer, seiner eigenen Auslastung und der potenziellen Belastung durch andere Angebote [VDI4504a].

Eine Besonderheit bei Umbauprozessen ergibt sich durch die Vorgabe des Kunden, wann das Objekt umgebaut werden kann. Der Generalauftragnehmer muss diese Vorgabe berücksichtigen und das Angebot darauf auslegen. Für ihn entsteht an dieser Stelle die Möglichkeit, sich gegenüber möglichen Mitbewerbern zu profilieren, wenn der Liefertermin der Vorgabe des Kunden entspricht, bzw. bereits früher realisiert werden kann und garantiert eingehalten wird. Die Liefertreue stellt einen der wichtigsten Kriterien für die Lieferantenauswahl und -bewertung dar [Voll03].

6 Ergebnisbereitstellung

Nach der Datenaufbereitung und der Lösungsfindung liegen die Inhalte für das Angebot vor. Das Ziel der Ergebnisbereitstellung ist es, das Angebot für den Kunden aufzuarbeiten und den Prozess zu dokumentieren. Dafür fasst der Generalauftragnehmer die erarbeiteten Inhalte zusammen und übermittelt sie dem Kunden (Abschnitt 6.1). Im letzten Schritt bereitet er den durchgeführten Prozess auf (Abschnitt 6.2).

Die Abschnitte leiten zunächst das Vorgehen her und definieren die einzelnen Teilschritte. Anschließend entwickeln sie die wesentlichen Methoden und Werkzeuge die das Vorgehen systematisch dabei unterstützen die definierten Anforderungen zu erfüllen.

6.1 Unterlagenbereitstellung

6.1.1 Angebotskonfiguration

Der Generalauftragnehmer finalisiert im Prozessschritt Unterlagenbereitstellung das Angebot und übergibt es dem Kunden. Zu diesem Zeitpunkt liegen alle inhaltlichen Ergebnisse vor. Der Generalauftragnehmer erstellt aus dieser Informationsgrundlage ein Angebot und bereitet die Unterlagen für den Kunden vor (Unterlagenbereitstellung). Im nächsten Schritt übergibt er dem Kunden das Angebot und vermittelt die wesentlichen Inhalte in einer Angebotspräsentation. Abbildung 6-1 stellt den Prozessschritt Angebotskonfiguration mit den Teilschritten, Eingangs- und Ausgangsgrößen dar.

Unterlagenvorbereitung

Um ein finales Angebot zu erstellen, muss der Generalauftragnehmer zunächst alle vorliegenden Ergebnisse zusammentragen und eine interne Kalkulation durchführen. Diese Kalkulation dient der Transparenz für den Generalauftragnehmer. Sie beinhaltet alle Kosten für den späteren Umbau und die Kosten der Angebotserstellung und für externe Dienstleister. Die Arbeit entwickelt eine Methode zur Kalkulation aller Leistungen.

Auf Basis der internen Kalkulation fasst der Generalauftragnehmer alle für den Kunden relevanten Informationen zusammen und erstellt das Angebot. Die DIN 4991 stellt ein Vorgehen zur Erstellung von Angeboten bereit und wurde deswegen für die vorliegende Problemstellung ausgewählt. Der Generalauftragnehmer bringt alle benötigten Unterlagen, die in den vorgelagerten Prozessschritten entstanden sind, in die entsprechende Form und kann sie als Anhang anfügen. Das Ergebnis ist das vollständige Kundenangebot.

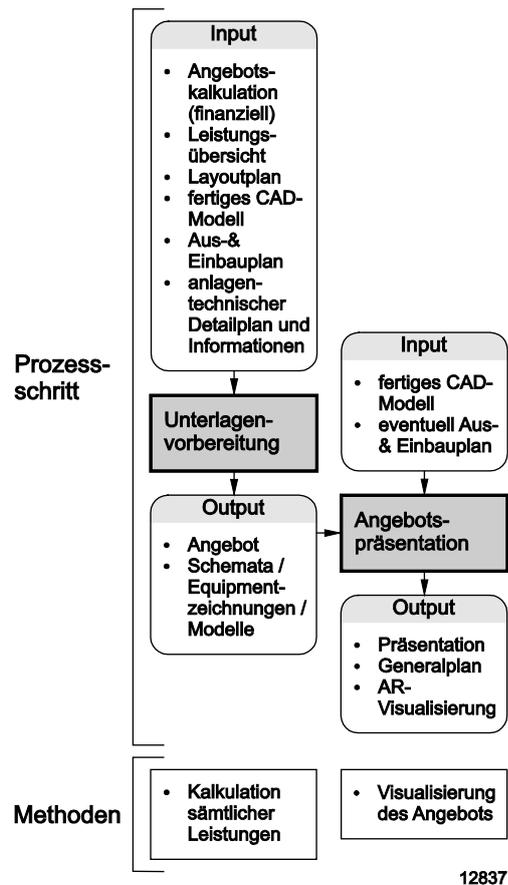


Abbildung 6-1: Unterlagenbereitstellung

Angebotspräsentation

Der Umbau komplexer Investitionsgüter verändert die Eigenschaften des Objekts. Das erstellte Angebot beinhaltet alle dazu erforderlichen Maßnahmen und Kalkulationen. Das Ziel des Generalauftragnehmers ist es an dieser Stelle, dem Kunden das Angebot zu präsentieren und ihn sowohl von den Maßnahmen als auch von der eigenen Kompetenz zu überzeugen.

Das nach der DIN 4991 aufbereitete Angebot enthält zwar alle Tätigkeiten und Preise; die Maßnahmen sind jedoch nicht zwingenderweise nachvollziehbar. Das Ziel der Richtlinie ist es, durch eine Standardisierung die Bearbeitung und Abwicklung des Handelsverfahrens zu vereinfachen [DIN4991]. Angehängte Zeichnungen und Erläuterungen helfen dem Kunden, die Maßnahmen zu verstehen, sind allerdings häufig nicht ausreichend, da die Entscheidungsträger und die späteren Betreiber in der Regel keine Konstrukteure sind. Die Methode zur Visualisierung des Angebots greift dieses Problem auf und stellt ein Werkzeug bereit, um die ausgewiesenen Maßnahmen verständlich darzustellen. Dieses Vorgehen erscheint dazu

geeignet, die von der VDI-Richtlinie 4504 geforderten Mehrwerte aus technischer und wirtschaftlicher Sicht überzeugend zu präsentieren und damit die Wahrscheinlichkeit für den Auftrag zu steigern.

6.1.2 Kalkulation sämtlicher Leistungen

Das Ziel der Kalkulation aller Leistungen ist es, dem Generalauftragnehmer eine monetäre Grundlage bereitzustellen, auf deren Basis er ein Angebot erstellen kann. Dafür muss diese Grundlage alle über das gesamte Projekt anfallenden Kostenpositionen berücksichtigen. Zudem muss der Generalauftragnehmer alle einzelnen Leistungen (Umbautätigkeiten, Konstruktionsaufwand) in monetäre Einheiten umrechnen können.

Aus den Outputs der einzelnen Teilschritte des Angebotserstellungsprozesses können die Kosten in sieben Gruppen inhaltlich zusammengefasst werden:

- Anlagenkosten
- Erfassung und Verarbeitung der Geometrie
- Engineering / Planung
- Logistik, Montagevorbereitung und Kontrolle
- Reise- und Transportkosten
- Montagearbeiten
- Dokumentation

Für die eigentliche Kalkulation wurde ein Kalkulationsformular entwickelt und in einer Tabellenkalkulation umgesetzt. Abbildung 6-2 stellt die Struktur des Formulars exemplarisch für eine Abgasnachbehandlungsanlage großer Motoren dar. Im oberen Bereich des Formulars kann der Nutzer die Kosten der neuen Komponenten überschlägig aus einigen Eingangsgrößen konfigurieren. Die Komponentenliste schlägt ihm automatisch Komponenten aus einer vorhandenen Datenbank vor.

Der Hauptteil des Formulars ist in die sieben oberen Kostengruppen gegliedert. Das Werkzeug schlägt dafür Aufwände aus Erfahrungen alter Projekte vor. Der Nutzer kann diese Aufwände bei Bedarf manuell anpassen. In dem dargestellten Beispiel sind die Kosten zur Erfassung der Ist-Geometrie angepasst, da das Objekt im Ausland erfasst werden soll.

Im untersten Bereich ermöglicht es das Werkzeug dem Nutzer spezielle Anpassungen über mehrere Kostengruppen vorzunehmen. Dies ist bspw. die Anpassung der Anlagenbereitstellungskosten oder der Aufschlag eines Sicherheitsfaktors über alle Kostengruppen. Abschließend berechnet das Formular die Gesamtkosten.

6 Ergebnisbereitstellung

Die Kalkulation der Leistungen ist branchen- und maßnahmenspezifisch. Der Generalauftragnehmer muss für jede Kategorie von Umbaumaßnahmen die sieben Abschnitte im Hauptteil des Formulars anforderungsgerecht befüllen. Ein systematisches Vorgehen, das vorhandene Wissen in die Abschnitte zu gliedern, unterstützt den Generalauftragnehmer [Bett01].

Kalkulationsformular					
Kalkulation der Anlagenkosten Die Leistung in kW, den Schwefelgehalt des Kraftstoffes in % und die Anzahl der Tage eingeben:			Komponentenliste automatisierte Komponentenauslegung		
Leistung	6000		Trocken-Scrubber	<input checked="" type="checkbox"/>	
Schwefelgehalt	1,5		Nass-Scrubber	<input type="checkbox"/>	
Tauschintervall	8		Granulatcontainer	<input checked="" type="checkbox"/>	
			...	<input type="checkbox"/>	
Kostengruppen		vorgeschlagene Aufwände		angepasste Aufwände	
	Menge	Zeitaufwand in AT	Kosten in EURO	Zeitaufwand in AT	Kosten in EURO
Anlagenkosten (Trocken-Scrubber)					
<input checked="" type="checkbox"/> Anlagenkosten	1	120,0	400.000	120,0	400.000
<input type="checkbox"/>
Erfassung und Verarbeitung der Geometrie					
<input type="checkbox"/> Manuelle Vermessung		-	-	-	-
<input type="checkbox"/> Photogrammetrie		-	-	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Laserscanning	1	2	4.000	3	6.000
<input type="checkbox"/>
Dokumentation					
<input type="checkbox"/>
Anlagenbereitstellung:				150	450.000
Umsetzung der Maßnahme:				60	400.000
Gesamt:				210	850.000
Sicherheitsfaktor: 1,2					
Gesamt mit Sicherheitsfaktor:				252	1.020.000

12878

Abbildung 6-2: Auszug aus dem Kalkulationsformular

6.1.3 Visualisierung des Angebots

Die vom Generalauftragnehmer an den Kunden üblicherweise übermittelten Unterlagen reichen oft nicht aus, um dem Kunden die bevorstehenden Arbeiten verständlich zu machen. Das Ziel der Visualisierung des Angebots ist es deshalb, dem Kunden die Maßnahmen und die Auswirkungen auf das Objekt nachvollziehbar zu vermitteln und damit die Auftragswahrscheinlichkeit zu steigern. Dafür muss der

Generalauftragnehmer die relevanten Schritte und die finale Lösung entsprechend aufbereiten. Der Aufwand sollte die Bereitstellung der klassischen Unterlagen wie Zeichnungen oder Zusammenbaupläne zumindest nicht deutlich überschreiten.

Wie bereits in den Abschnitten 4.1.3 und 5.1.2 erläutert, eignet sich die Augmented-Reality-Technologie besonders gut als Plattform, um dem Kunden komplizierte Inhalte zu vermitteln. Es kann die neuen Komponenten direkt in die Umgebung einblenden und damit die Maßnahmen dem Kunden verständlich präsentieren.

Der Kunde muss die einzelnen Teilschritte der Umbaumaßnahmen und die Gesamtlösung verstehen. Die Inhalte sind an dieser Stelle im Prozess final definiert und müssen nicht mehr verändert werden. Eine umfangreiche Interaktion mit dem System wie bei der AR-Variantenplanung und die Zusammenarbeit mit mehreren Personen sind daher nicht erforderlich. Die Interaktion muss lediglich das sequentielle Darstellen der einzelnen Teilschritte ermöglichen. Um das Verständnis des Kunden zu fördern, sollte er zudem die Möglichkeit erhalten, die Komponenten ein- bzw. auszublenden.

Durch die Anforderungen an die Interaktion und die Benutzung durch nur eine Person sind AR-Brillen zur Visualisierung des Angebots neben Tablet-Computern ebenfalls geeignet. Die Software setzt auf den modularen Ansatz der AR-Darstellung und AR-Variantenplanung (vgl. Abschnitt 4.1.3, 5.1.2) auf und erweitert sie um das Modul AR-Angebotsvisualisierung. Abbildung 6-3 stellt die Komponenten des modularen AR-Systems schematisch dar.

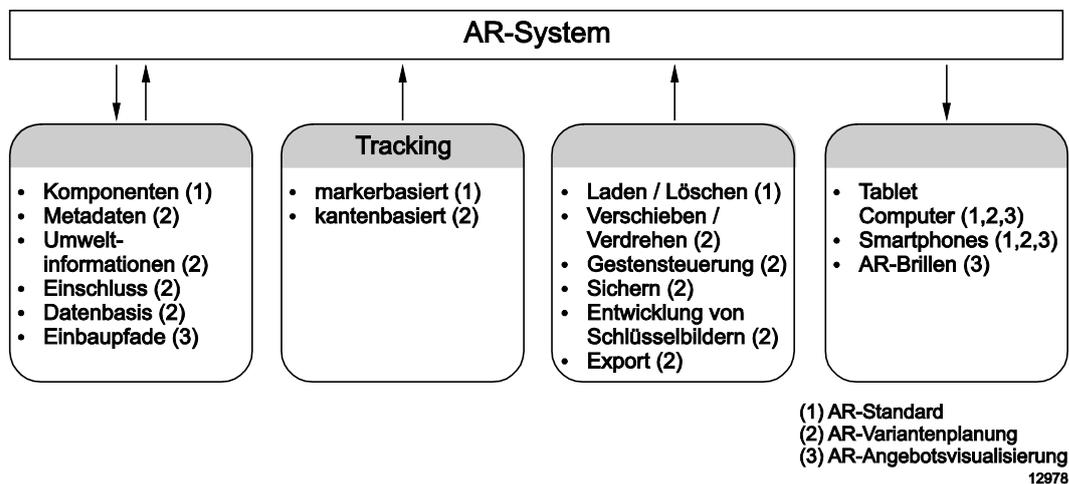


Abbildung 6-3: Schematischer Aufbau des entwickelten AR-Systems

Für die Darstellung der einzelnen Teilschritte der Umbaumaßnahmen sind Animationen besonders geeignet. Durch die Bewegungen der Bauteile stärken sie das Verständnis des Kunden. Deshalb visualisiert das AR-System die Demontage und anschließend die Montage der Komponenten als Animationen. Der Generalauftragnehmer importiert dafür die erarbeiteten Pfade in das AR-System nach dem Ansatz von Heinig [Hein15]. Die Tätigkeiten sind als Demontage- und Montageaktivitäten klassifiziert und liegen mit weiteren Zusatzinformationen vor. Die AR-Angebotsvisualisierung bereitet die Schritte auf und hebt die Pfade visuell hervor (rot bei Demontage- und grün bei Montageoperationen, Abbildung 6-4). Der Generalauftragnehmer kann die Schritte unterbrechen und einzelne Sachverhalte aus einem anderen Blickwinkel erklären. Zusätzlich zeigt das System optional die Aufwände der einzelnen Schritte an. Diese Maßnahmen schaffen eine Transparenz der Umbauschritte und damit des Angebots.

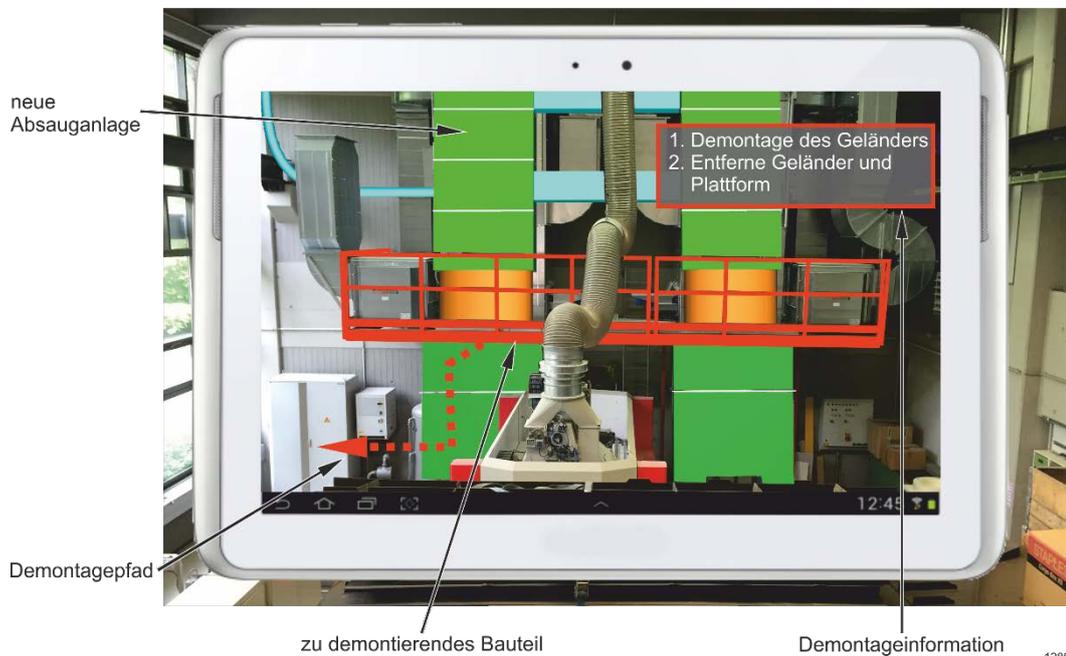


Abbildung 6-4: AR-Angebotsvisualisierung [Tito15]

Die Qualität der Planung der Maßnahmen gibt die Qualität der AR-Angebotsvisualisierung vor. Die im Projekt vorliegende Datengrundlage ist für einen Einsatz des Systems dagegen weniger entscheidend. Erzeugt der Generalauftragnehmer im Projekt kein Geometriemodell, so kann die Angebotsvisualisierung trotzdem zur Präsentation eingesetzt werden. Dafür beinhaltet das Tracking neben dem hybriden Verfahren der AR-Variantenplanung zusätzlich das Markertracking des AR-Darstellungsmoduls.

6.2 Prozessaufbereitung

6.2.1 Dokumentation

Letzter Schritt der Angebotserstellung ist die Prozessaufbereitung (Abbildung 6-5). Ziel ist es, die Qualität der Angebote durch Erfahrungen und Fehler alter Projekte stetig zu verbessern. Dafür erfüllt dieser Prozessschritt drei Aufgaben:

- Dokumentation der Ergebnisse
- Sammeln und Verwerten von Erfahrungswissen
- Projektcontrolling

Die Dokumentation der einzelnen Teilschritte erfolgt anhand der erzeugten Outputs. Der Generalauftragnehmer kann den Prozess und alle Entscheidungen anhand dieser nachvollziehen. Neben den reinen Ergebnissen sammelt der Generalauftragnehmer Erfahrungen im Laufe des Prozesses. Diese sind für die Qualität der Angebote entscheidend. Koch stellt ein Verfahren für den Umgang mit Erfahrungswissen für die Projektierung von Schiffen vor [Koch04]. Die von ihm vorgeschlagene Knowledge Lounge ist auf die Angebotserstellung für Umbaumaßnahmen komplexer Investitionsgüter übertragbar. Der Generalauftragnehmer muss dazu die Kriterien einmalig an die Branche und das Produktportfolio anpassen.

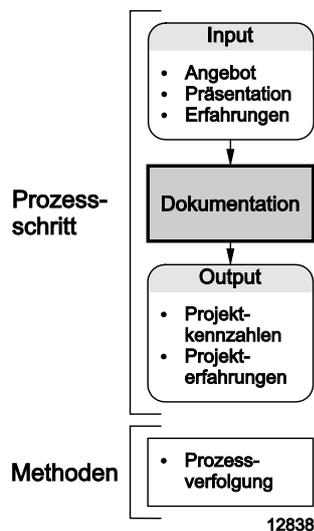


Abbildung 6-5: Prozessaufbereitung

Der Generalauftragnehmer benötigt neben der Dokumentation der Ergebnisse und Erfahrungen Informationen über eine erfolgreiche Durchführung des Projekts. Kennzahlen verfolgen das Projekt zur Laufzeit, erlauben dem Generalauftragnehmer bei Bedarf einzugreifen und stellen einen generellen Erfolgsgrad des Projekts dar. Die Methode zur Prozessverfolgung stellt dem Generalauftragnehmer zwei

Kennzahlen (relative Kostenabweichung und relative Terminabweichung) zur Verfügung, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

6.2.2 Prozessverfolgung

Jede Angebotserstellung ist ein separates Projekt mit unterschiedlichen Einflussgrößen (vgl. Abschnitt 4.1.4). Obwohl der Basisprozess der gleiche ist, unterscheiden sich die Projekte sowohl im Ablauf als auch im Ergebnis. Hohe Kosten der Angebotserstellung, eine geringe Auftragswahrscheinlichkeit und vom Kunden vorgegebene zeitliche Rahmenbedingungen (vgl. Abschnitt 2.2.4) erfordern einen besonderen Fokus auf die Zieldimensionen Kosten und Zeit. Ein Projektcontrolling, das diese Zielgrößen berücksichtigt, ist dadurch wichtig für die erfolgreiche Angebotserstellung.

Um ein Controlling durchzuführen, muss die Planung eine entsprechende Datengrundlage bereitstellen. Der Generalauftragnehmer plant die Termine und die Kosten sämtlicher Schritte in der Initialisierungsphase des Projekts Angebotserstellung. Eine Planung der Kosten (*PV* – Planned Value [PMI13]) kann auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen des Prozesses erfolgen (Schritte, Teilschritte, Outputs). In verschiedenen Untersuchungen hat sich eine Detaillierung auf Teilschrittenebene als praktisch erwiesen, da die Schritte inhaltlich getrennt sind und häufig von unterschiedlichen Mitarbeitern des Generalauftragnehmers bearbeitet werden.

Diese Kosten sind vereinfachend als S-Kurven darstellbar (Abbildung 6-6). Für den Einsatz in der Angebotserstellung werden dabei die kumulierten Kosten über der Zeit aufgetragen. Eine Betrachtung der kumulierten Kosten ist an dieser Stelle dem Stunden-Aufwand zu bevorzugen, da unterschiedliche Stellen die einzelnen Arbeitsschritte bearbeiten (bspw. Konstrukteure, technische Zeichner, Einkäufer) und einzelne Arbeitsschritte komplett an externe Unterauftragnehmer vergeben werden können (bspw. die Erfassung der Ist-Geometrie). Rechts sind die Projektschritte eingetragen.

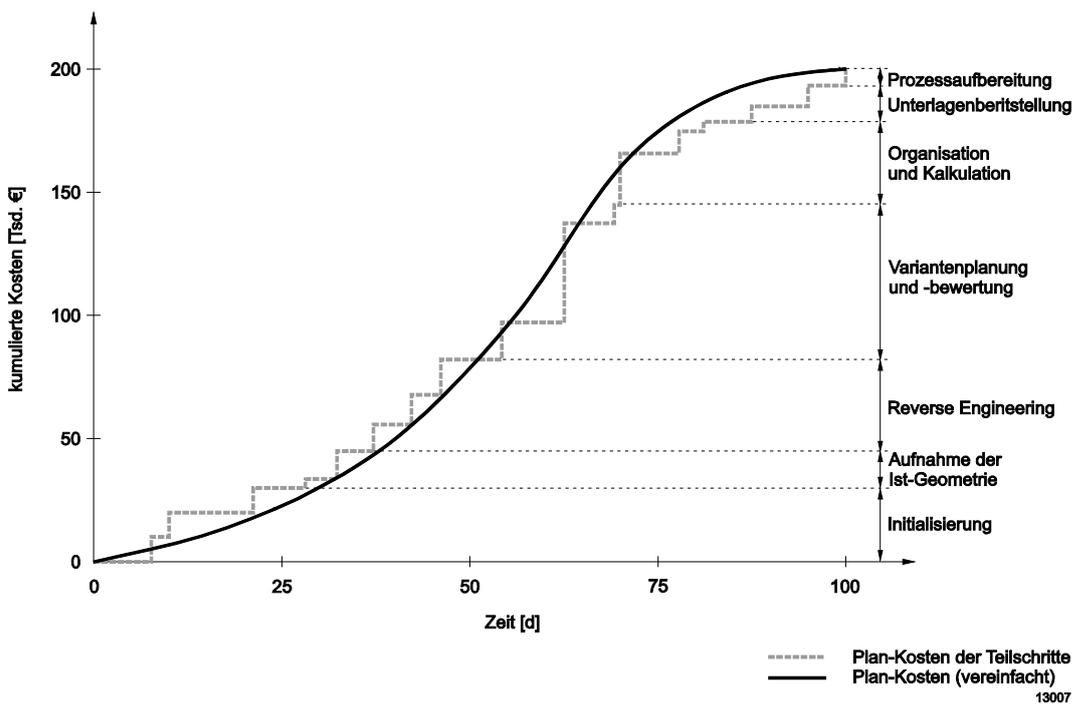


Abbildung 6-6: Geplante Projektkosten der Angebotserstellung

Der geplante Verlauf der Projektkosten steht damit am Anfang des Projekts fest. Zur Laufzeit des Projekts und abschließend in dem letzten Schritt des Projekts muss der Generalauftragnehmer die Termin- und Kosteneinhaltung verfolgen, um bei Abweichungen zu reagieren. Für diese Auswertung muss der Generalauftragnehmer die angefallenen Ist-Kosten und den erreichten Fertigstellungswert des Angebots zum Zeitpunkt der Betrachtung erfassen.

Die Ist-Kosten (AC – Actual Cost) kann der Generalauftragnehmer aus den eigenen Systemen entnehmen, bspw. durch die verbuchten Stunden seiner Mitarbeiter auf das Projekt und den Stundensätzen. Der Fertigstellungswert (EV – Earned Value) ist bei Projekten schwer zu ermitteln [Kerz03]. Kernzer schlägt dafür die 50/50 Methode vor. Bei großen Arbeitsinhalten und wenigen Schritten, wie sie in der Angebotserstellung komplexer Investitionsgüter vorliegen, ist diese Approximation allerdings ungeeignet. Ein sinnvolles Vorgehen besteht in der Verwendung eines vom Generalauftragnehmer geschätzten Erfüllungsgrads der einzelnen Teilschritte. Zu festgelegten Zeitpunkten, bspw. täglich oder wöchentlich, erhebt der Generalauftragnehmer den Erfüllungsgrad der einzelnen Schritte. Der Fertigstellungswert lässt sich damit berechnen zu:

$$EV = \sum_{i=1}^l (EG_i * PV_i) \quad (13)$$

- EV* : Fertigstellungswert [€]
EG_i : Erfüllungsgrad des Teilschritts *i* [%]
PV_i : Plan-Kosten des Teilschritts *i* [€]

Die erfasste Größe der Ist-Kosten und der geschätzte Fertigstellungswert können nun zu bestimmten Zeitpunkten im Projekt den Plan-Kosten gegenübergestellt werden. Abbildung 6-7 stellt exemplarisch die Zusammenhänge zum Zeitpunkt heute dar. Aus dieser Darstellung kann der Generalauftragnehmer die kostenbezogene und die terminbezogene Abweichung ablesen. Die kostenbezogene Abweichung (hier: 30 Tsd. €) ergibt sich aus der Differenz des Fertigstellungswerts (130 Tsd. €) und den angefallenen Ist-Kosten (160 Tsd. €). Sie stellt die Mehr- bzw. Minderkosten dar, die bisher entstanden sind, um den bisherigen Fertigstellungswert zu erreichen. Die terminbezogene Abweichung (hier: 50 Tsd. €) ist die Differenz der kumulierten Plan-Kosten (180 Tsd. €) und des erreichten Fertigstellungswerts (130 Tsd. €). Dividiert man die terminbezogene Abweichung (50 Tsd. €) durch den bisher erreichten durchschnittlichen Fertigstellungswert pro Tag (1.625 €/Tag), ergibt sich der zeitliche Rückstand (31 Tage). Der durchschnittliche Fertigstellungswert pro Tag hängt dabei von dem Zeitpunkt im Projekt und dem zu betrachtenden Arbeitspaket ab. Dieser kann näherungsweise als Division des kumulierten Fertigstellungswerts *EV* (hier: 130 Tsd. €) und der Projektdauer in Tagen (80 Tage) zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet werden.

$$RS = \frac{TA}{EV_m}, \quad \text{mit} \quad EV_m = \frac{EV [€]}{\text{Projektdauer [Tag]}} \quad (14)$$

- RS* : Rückstand [Tag]
TA : terminbezogene Abweichung [€]
EV_m : mittlerer Fertigstellungswert pro Tag [€/Tag]

Der terminbezogene und der kostenbezogene Rückstand verdeutlichen dem Generalauftragnehmer, wie weit das Projekt vom Plan abweicht. Er kann dann verschiedene Maßnahmen ergreifen, wie bspw. die Erhöhung der Kapazitäten oder die Vergabe weiterer Aufträge an Unterauftragnehmer, und das Projekt damit steuern.

Führt der Generalauftragnehmer die beschriebene Betrachtung regelmäßig zur Projektlaufzeit durch, kann er den Verlauf des Projekts skizzieren. Am Ende der Angebotserstellung bekommt er so einen Überblick über die Übereinstimmung der Planwerte und dem tatsächlichen Verlauf und kann dies für die Planung neuer Projekte berücksichtigen.

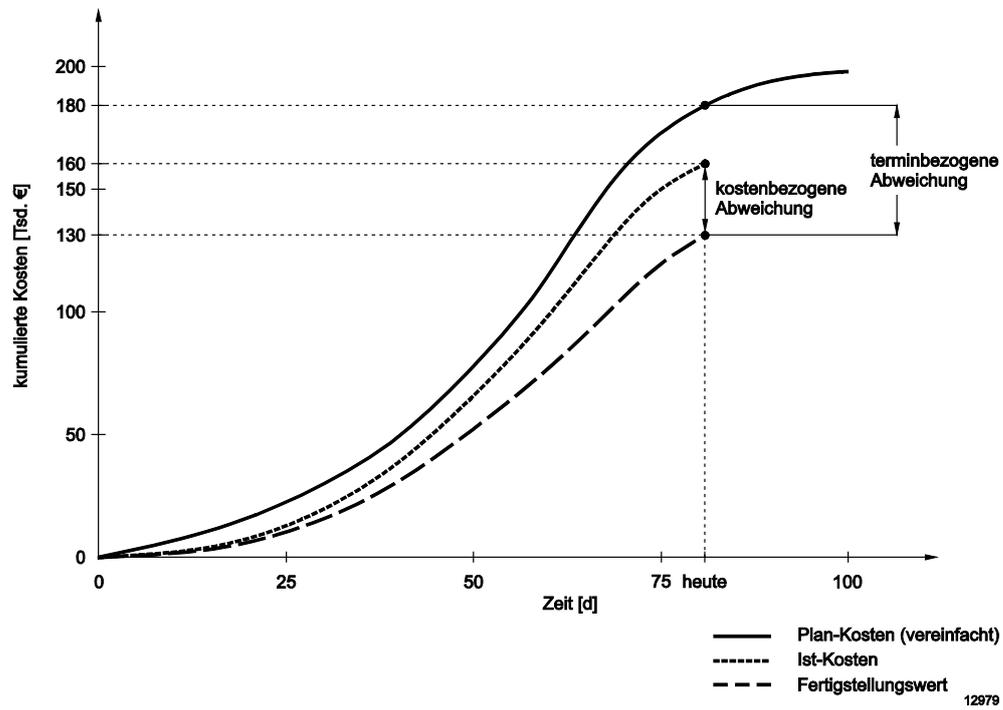


Abbildung 6-7: Termin- und Kostenabweichung des Projekts Angebotserstellung

7 Evaluation

Dieses Kapitel evaluiert die Praxistauglichkeit des entwickelten Konzepts und der dafür entwickelten Methoden und Hilfsmittel. Abschnitt 7.1 definiert zunächst die Ziele und beschreibt das Vorgehen der Evaluation. Abschnitt 7.2 validiert die Praxistauglichkeit der einzelnen Werkzeuge, bevor 7.3 das Konzept und die Methoden an einem Praxisbeispiel anwendet und evaluiert.

7.1 Überblick und Ziele

Das Ziel der Evaluation ist die sach- und fachgerechte Bewertung der Werkzeuge, der Methoden und des Konzepts. Diese Bewertung teilt sich in die Bewertung der entwickelten technologischen Werkzeuge und die Bewertung des ganzheitlichen Verfahrens an einem Praxisbeispiel.

Die technologischen Werkzeuge lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Neuentwicklungen und adaptierte Werkzeuge. Die neu entwickelten Werkzeuge benötigen neben einer Evaluation im Gesamtprozess eine separate Evaluation. Dafür wurden sie prototypisch umgesetzt. Adaptierte Werkzeuge bauen auf bereits vorhandenen Konzepten auf und stellen eine Anpassung an die vorliegenden Anforderungen dar. Die Evaluierung solcher Werkzeuge erfolgt in der vorliegenden Arbeit im Gesamtprozess an einem realen Angebot. Dafür wurden die Werkzeuge zusammen mit dem Generalauftragnehmer final an die angebotenen Umbaumaßnahmen und die vorliegende Branche angepasst. Abbildung 7-1 stellt eine Übersicht der Werkzeuge und deren Evaluierung dar.

Werkzeug	Abschnitt	Einzelevaluation (Abschnitt 7.2)	Evaluation im Gesamtprozess (Abschnitt 7.3)
Fragebogen für die Aufnahme projektbezogener Daten	4.1.2		x
Prozesskonfigurator	4.1.4	x	
Untersuchungsbereichsfestlegung	4.2.2		x
Frühabschätzungstool	4.2.3	x	
Mobile Aufnahmeplattform	4.2.4	x	
Lastenheft	4.3.2		x
Virtuelle Lösungsdarstellung und -planung	4.1.3 5.1.2 6.1.3	x	
Bewertungsmethode Ergonomie	5.1.3		x
VIP-Toolset Ergonomie	5.1.4	x	
Angebotskonfiguration	6.1.2		x
Prozesskennzahlen	6.2.2		x

12918

Abbildung 7-1: Übersicht der Evaluation

7.2 Software-Prototypen

Die neuentwickelten Werkzeuge wurden für die Evaluation prototypisch umgesetzt. Da für diese Werkzeuge keine direkten Vergleichswerkzeuge bekannt sind, bewertet sie die Arbeit nach Kriterien, die Kroell in seiner Dissertation für die Bewertung von Technologien vorschlägt [Kroe07]. Das Verfahren ist generisch aufgebaut und erlaubt eine an das Problem angepasste Auswahl der einzelnen Bewertungspunkte. Die Bewertung der Werkzeuge erfolgt einheitlich nach den Bewertungskriterien (BK) der vier Hauptkategorien:

- Qualität / Funktionalität (BK1)
- Flexibilität (BK2)
- technologischer Reifegrad (BK3)
- Kosten-Nutzen-Verhältnis (BK4)

Die Qualität bzw. Funktionalität umfasst mehrere Unterkriterien. Diese sind die Funktionserfüllung aus Kunden- und Unternehmenssicht, die Robustheit des Werkzeugs sowie die Imagewirkung. Die Bewertung der Flexibilität berücksichtigt die Skalierbarkeit der Werkzeuge. Dies beschreibt, wie gut das Werkzeug modularisierbar und damit an andere Problemstellungen adaptierbar ist. Die Kriterien technologischer Reifegrad und das Kosten-Nutzen-Verhältnis zielen auf einen produktiven Einsatz der Werkzeuge in der Industrie und gehen über den Prototypenstatus hinaus. Sie umfassen daher eine Abschätzung des Weiterentwicklungspotenzials und der Zuverlässigkeit des Werkzeugs für den technologischen Reifegrad. Die Bewertung des Mehraufwands und der erbrachten Vorteile bestimmt das Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Die Arbeit evaluiert die Werkzeuge in der Reihenfolge des Einsatzes im entwickelten Angebotserstellungsprozess:

- Prozesskonfigurator (Abschnitt 7.2.1)
- Aufwandsabschätzung (Abschnitt 7.2.2)
- Aufnahme der Geometrie mit 3D-Kameras (Abschnitt 7.2.3)
- Virtuelle Lösungsdarstellung und -planung (Abschnitt 7.2.4)
- Ergonomieabsicherung mit dem ViP-Toolset (Abschnitt 7.2.5)

7.2.1 Prozesskonfigurator

Der Prozesskonfigurator unterstützt den Benutzer dabei, den Angebotsprozess zu konfigurieren. Er reduziert den gesamten Angebotserstellungsprozess auf die für das vorliegende Projekt relevanten Schritte in mehreren Detaillierungsebenen. Im ersten Schritt erfolgt dies durch die Vorgaben des Kunden. Weiterhin kann der Ge-

neralbeauftragter einzelne Schritte, Teilschritte oder Outputs aus dem Projektplan entfernen. Abschließend terminiert der Prozesskonfigurator den reduzierten Projektplan. Die prototypische Implementierung erfolgte in einem eigenständigen Werkzeug. Abbildung 7-2 stellt den angepassten Projektplan dar. Die Teilschritte Konvertierung in ein 3D-Modell, Nachbearbeitung des 3D-Modells und die Kapazitätsermittlung sind deaktiviert und nicht Teil des Prozesses.

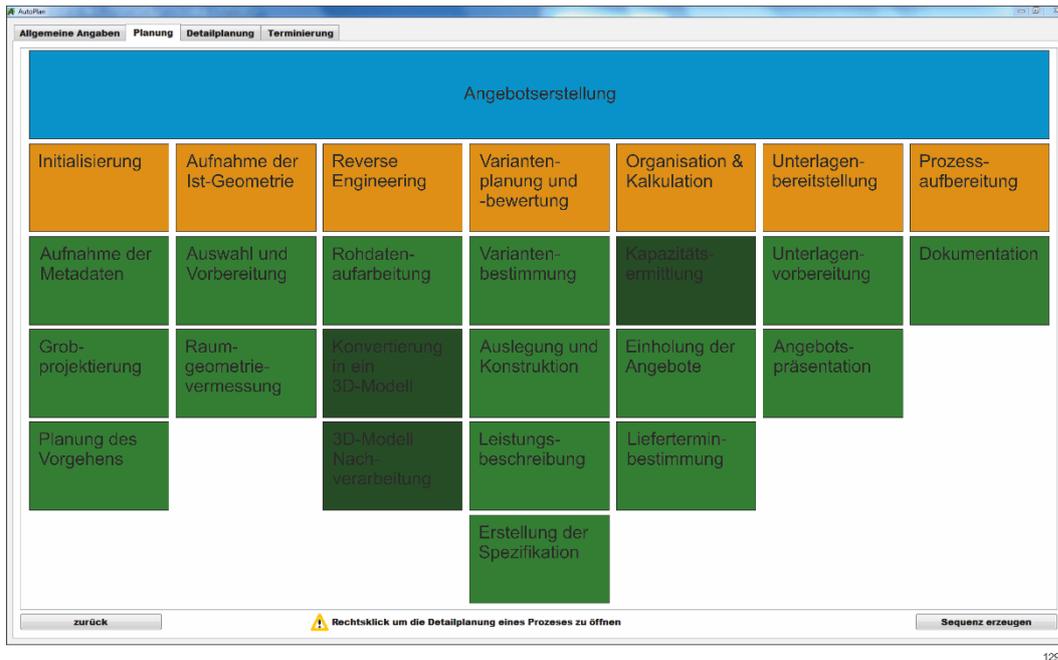


Abbildung 7-2: Prototypische Umsetzung des Prozesskonfigurators

Das Werkzeug wurde zunächst durch einen Generalbeauftragten mit alten Projektplänen und anschließend im Praxiseinsatz evaluiert. Das Ziel war es jeweils, den Projektplan mit allen benötigten Schritten und Outputs zu erzeugen. Der Generalbeauftragte setzte dieses Werkzeug für die Erzeugung des Projektplans und die Dokumentation aller erforderlichen Schritte ein. Über die hinterlegten Logiken konnte er nicht benötigte Schritte entfernen und die Auswirkungen auf den Prozess direkt beurteilen. Einige der als variabel eingestuften Aufwände musste der Benutzer aus unterschiedlichen Gründen anpassen. Die Exportfunktion des Projektplans wurde in der Evaluation nicht verwendet, der Generalbeauftragte hat direkt mit dem Werkzeug weitergearbeitet. Aus Sicht des Generalbeauftragten konnte das Werkzeug die Anforderungen erfüllen und ihn dabei unterstützen den Projektplan aufwandsarm zu konfigurieren. Es soll für weitere Projekte des Generalbeauftragten zum Einsatz kommen. Für die Bewertungskriterien nach Kroell ergeben sich folgende Ergebnisse:

BK1 (Funktionalität): Der Prozesskonfigurator ist von allen projektbeteiligten Mitarbeitern bedienbar. Einzelne Anpassungen wirken sich direkt auf den Prozessplan aus und verändern die Terminierung. Die Funktionalität des Konfigurators ist damit vollständig erfüllt. Das Werkzeug baut auf hinterlegten Tabellen und Datenbanken auf, visualisiert die Ergebnisse und erlaubt ihre Veränderung. Da keine komplexen Berechnungen oder aufwendige Benutzeroberflächen benötigt wurden, ist das Werkzeug sehr robust.

BK2 (Flexibilität): Die Funktionalitäten des Konfigurators sind fest, die verwendeten Daten allerdings flexibel. Der Benutzer kann einen veränderten oder personalisierten Prozess für die Grundlage der Planung verwenden. Damit ist die Nutzung für spezialisierte Angebote oder weitere Schritte möglich.

BK3 (technologischer Reifegrad): Das Werkzeug ist für die vorgesehenen Funktionen ausgereift. Die Einsatzerfahrungen beim Generalauftragnehmer haben gezeigt, dass die Aufbereitung des Prozesses zuverlässig und detailliert ist. Weiterhin ist die Verwendung über den weiteren Prozess möglich. Für die betrachtete Problemstellung hat das Werkzeug das Potenzial, die Geschäftsprozesse zu modellieren und die Verwendung weiterer Software zu vermeiden.

BK4 (Kosten-Nutzen-Verhältnis): Der Konfigurator benutzt den vollständigen Angebotserstellungsprozess als Datengrundlage und liefert dem Benutzer einige Hilfestellungen (bereits hinterlegt Verknüpfungen der Prozessschritte oder hinterlegte Aufwände), um den Prozess möglichst aufwandsarm zu konfigurieren. Verglichen zu einer klassischen Neuplanung in bspw. MS Project oder ARIS ist der Aufwand sehr gering, da der Benutzer keine Prozessschritte anlegen muss, sondern lediglich nicht benötigte Schritte abwählt. Zudem ist der Prozesskonfigurator an die jeweilige Problemstellung angepasst und dem Benutzer stehen nur die jeweils benötigten Funktionen zur Verfügung. Ergebnis ist ein Projektplan mit hinterlegten Aufwänden und Terminen. Diesen kann der Benutzer in gängigen Projektmanagementwerkzeugen weiterverwenden.

7.2.2 Frühabschätzungstool

Das Frühabschätzungstool dient zur Bewertung des Aufwands für die Vermessung der Ist-Geometrie im Prozessschritt Aufnahme der Ist-Geometrie. Als Evaluations-szenarien wurden drei unterschiedliche Bereiche gewählt. Ein Vermessungsdienstleister sollte dabei einen Teil des Maschinenraums, einen Pumpenraum und einen Teil des Abgasschachts vermessen. Der Generalauftragnehmer hat den zu vermessenden Teil des Maschinenraums und des Abgasschachts als AOI-Bereich zwei (für den Umbau relevante, beim vorliegenden Projekt jedoch nicht kritische Bereiche) und den Pumpenraum (möglicher Platz für Elektrik und Tanks) als AOI-Bereich drei eingestuft. Die Umgebungen unterscheiden sich weiterhin in der Dichte, der durchschnittlichen Größe der Bauteile und dem zu vermessenden Volumen (vgl.

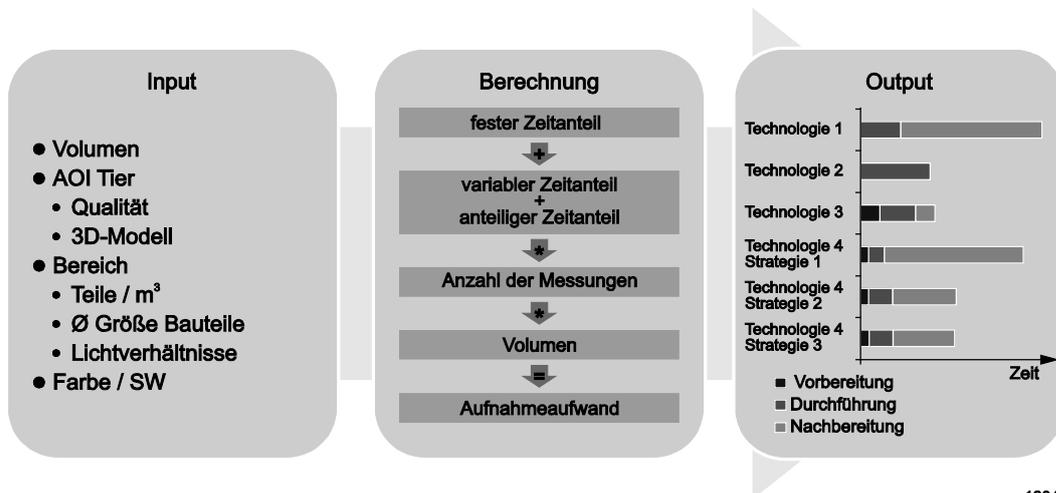
Abschnitt 4.2.3). Die vorhandenen Komponenten des Maschinenraums und des Abgasschachts wurden als groß und dicht verbaut klassifiziert. Der Pumpenraum weist Komponenten moderater Größe und einen moderaten Verbaustatus auf. Die Rahmenbedingungen fasst Abbildung 7-3 zusammen.

Einflussgrößen		Formelzeichen	Maschinenraum	Pumpenraum	Abgasschacht
Qualität	AOI Bereich	AOI_Q	2	3	2
Bereich	Dichte der Bauteile	D_T	3	2	3
	Durchschnittliches Volumen der Teile	V_T	1	2	1
Volumen	Volumen der Umgebung	$V_{A,AOI}$	1117m ³	615m ³	802m ³
Scanner	Farbinformationen		Farbe	Farbe	SW

12919

Abbildung 7-3: Rahmenbedingungen der Evaluationsaufnahmen

Für einen einfachen Vergleich der unterschiedlichen Vermessungstechnologien wurde ein Software-Prototyp implementiert. Abbildung 7-4 stellt die Funktionslogik des Frühabschätzungstools dar. Der Benutzer gibt die vorgegebenen Rahmenbedingungen in das Werkzeug ein und nimmt Einstellungen für die Aufnahmetechnologien vor. Das Ergebnis ist eine Aufwandsverteilung für die Aufnahme in Minuten. Diese ist in die Schritte Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung unterteilt.



12841

Abbildung 7-4: Frühabschätzungstool für die Aufnahme der Ist-Geometrie

Abbildung 7-5 stellt für die drei betrachteten Umgebungen die errechneten Durchführungszeiten den in der Praxis gemessenen Zeiten für die Technologie Laserscanning gegenüber. Für die zuvor beschriebenen Kriterien ergibt sich folgende Bewertung:

	Einheit	Maschinenraum	Pumpenraum	Abgasschacht
Errechnete Durchführungszeit	[Min.]	156	99	59
Gemessene Durchführungszeit	[Min.]	170	110	52
absolute Abweichung	[Min.]	14	11	7
relative Abweichung	[%]	8,1	9,4	13,3

12920

Abbildung 7-5: Validierung der Aufwandsabschätzung

BK1 (Funktionalität): Die absolute Abweichung bei den drei Beispielen beträgt maximal 14 Minuten. Der Fehler entsteht durch die grobe Bereichsteilung (eine Klassifizierung ist nur von 1 bis 3 vorgesehen). Der Benutzer schätzt diese Kategorien anhand von Zeichnungen ab, bevor er das Objekt betritt. Die maximale relative Abweichung lag mit 13,3% unter der geforderten Genauigkeitsgrenze von 15% (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Die Evaluationsbeispiele belegen, dass die Abschätzung in den vorgegebenen Grenzen zuverlässig ist. Eine weitere Benutzung des Werkzeugs erhöht zudem die Datenbasis und verfeinert die momentan vorliegenden Basiswerte (Anzahl der Messungen pro Volumenelement $N_{M, n}$ und die variable Aufnahmedauer T_{var}). Dadurch wird das Werkzeug zuverlässiger und robuster.

BK2 (Flexibilität): Für die Nutzung des Werkzeugs in unterschiedlichen Branchen muss der Benutzer lediglich die Bereiche definieren. Für eine Berücksichtigung weiterer Aufnahmetechnologien und -strategien muss der Benutzer mit Hilfe einer systematischen Versuchsplanung den Einfluss der Faktoren Vollständigkeit, Dichte der Bauteile und durchschnittliche Größe auf die Anzahl der Aufnahmen pro Volumenelement ermitteln. Für alle Kombinationen ist dies ein aufwendiger Schritt. Eine Skalierbarkeit, also Übertragbarkeit auf weitere Branchen ist dadurch gegeben, eine Erweiterung um neue Aufnahmetechnologien jedoch mit hohem Aufwand verbunden.

BK3 (technologischer Reifegrad): Das Werkzeug ist für den vorliegenden Detaillierungsgrad gut geeignet. Es verwendet als Datenbasis die Versuchsergebnisse (vgl. Abschnitt 4.2.3). Weitere Daten neuer Projekte (bspw. die Daten aus der Evaluierung) können die Qualität der Abschätzung weiter verbessern. Die hinterlegten Zusammenhänge kann der Benutzer anpassen und bei Bedarf weitere Einflussfaktoren definieren. In dem aktuellen Detaillierungsgrad lässt sich das Werkzeug auf andere Branchen übertragen. Potenzial zur Weiterentwicklung besteht in der Erweiterung auf feinere Bereichsabschätzungen durch detailliertere Faktorstufen und in der Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren.

BK4 (Kosten-Nutzen-Verhältnis): Der Aufwand der Abschätzung liegt in der Definition der Rahmenbedingungen. Der Benutzer muss anhand von Zeichnungen und

Plänen die Einflussgrößen ermitteln und die Vollständigkeit der Aufnahmen festlegen. Untersuchungen in der Praxis haben gezeigt, dass ein erfahrener Vermesser das in wenigen Minuten schafft. Der Aufwand zur Benutzung des Werkzeugs ist damit sehr gering und kann normalerweise vernachlässigt werden. Der Nutzen ist für den Vermesser klar definiert. Er kann die Aufnahme sehr zielgerichtet durchführen und die geeignete Technologie für die jeweilige Umgebung wählen. Zudem kann er den Aufwandaufwand abschätzen und eine Aussage über die Kosten der Aufnahme treffen. Der Generalauftragnehmer kann das Werkzeug benutzen, um das Angebot des Vermessers zu verifizieren. Ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis ist damit sowohl für den Vermesser und den Generalauftragnehmer gewährleistet.

7.2.3 Mobile Aufnahmeplattform

Das in Abschnitt 4.2.4 vorgestellte Verfahren zur Aufnahme der Ist-Geometrie mit 3D-Kameras wurde umgesetzt und für eine Anwendung in den hier betrachteten Branchen validiert [Hala13]. Der Algorithmus lief auf einem Vermessungsrechner und eine MS Kinect wurde auf der Mobilen Scaneinheit (MSE) zur Vermessung verwendet. Als Evaluationsszenarien dienten der in Abschnitt 7.2.2 beschriebene Pumpenraum und ein weiterer, kleinerer Maschinenraum. Das Gesamtvolumen beider Räume beträgt 1130m³. Als Referenz wurde die weit verbreitete Laserscantechnologie ausgewählt (Scanner: FARO Focus 3D). Die Netto-Aufnahmedauer der 3D-Kamera liegt mit 2 Stunden und 43 Minuten im Bereich der Aufnahmedauer von Laserscannern und ist damit für einen Einsatz für die Vermessung komplexer Investitionsgüter grundsätzlich geeignet (s. Abbildung 7-6). Eine Bewertung nach den Kriterien ergibt:

	Maschinenraum	Pumpenraum	Gesamt
Raumgröße	515m ³	615m ³	1130m ³
Scandauer 3D-Kamera	60min	103min	163min
Scandauer Laserscanner (Farbe)	60min	110min	170min

12921

Abbildung 7-6: Bewertung der Aufnahme mit 3D-Kameras

BK1 (Funktionalität): Der Einsatz der 3D-Kameras hat gezeigt, dass sie auch die Geometrie großer Umgebungen aufnehmen können (s. Abbildung 7-7). Die Entkopplung der Aufnahme- von der Rechereinheit und die Erweiterung des maximalen Aufnahmevolumens erlauben einen produktiven und kostengünstigen Einsatz in der Praxis. Probleme ergeben sich durch direkte Sonneneinstrahlung oder bei der Aufnahme glatter Wände. Für eine Aufnahme mit diesem Verfahren eignen sich besonders Umgebungen mit einer hohen Dichte an Bauteilen oder komplexe Objekte.

Für eine Bewertung der Robustheit muss zwischen dem Algorithmus und Benutzung der MSE differenziert werden. Die Auslagerung nur bestimmter Eingabemöglichkeiten vom Algorithmus der Rechneinheit an die MSE vermeidet Fehlbedienungen und ist damit gegenüber dem Benutzer robust. Die Handhabung der MSE allerdings liegt komplett beim Benutzer. Er bestimmt die Aufnahme und kann über bestimmte Grenzen, wie Aufnahmegeschwindigkeit oder Drehungen der Kamera, leicht hinausgehen und Fehler erzeugen.



Abbildung 7-7: Aufnahme eines Maschinenraums mit einer 3D-Kamera

BK2 (Flexibilität): Eine Skalierbarkeit des Verfahrens ist gegeben. Der Algorithmus ist modularisierbar und damit für andere Problemstellungen erweiterbar.

BK3 (technologischer Reifegrad): Untersuchungen in der Praxis haben gezeigt, dass etwa 30% der Aufnahmen fehlerhaft sind. Der Benutzer erkennt das zwar sofort, muss allerdings die gesamte Aufnahme wiederholen. Das liegt an der Beschaffenheit der Umgebung, der Sensibilität des Sensors und nicht zuletzt an in der Praxis ins Bild laufenden Personen. Die Zuverlässigkeit des Verfahrens ist dadurch als mangelhaft zu klassifizieren. Der Benutzer erkennt diese Aufnahmen allerdings bei der Ausführung und kann die Problemstellen direkt neu aufnehmen. Das Weiterentwicklungspotenzial ist sowohl auf der Hardware- als auch auf der Softwareseite sehr groß. Eine deutliche Verbesserung der Zuverlässigkeit ist damit zu erwarten.

BK4 (Kosten-Nutzen-Verhältnis): Das Aufnahmeverfahren liefert direkt vermaschte Oberflächen und integriert Farbwerte in das Modell. Zusätzlich ermöglicht die direkte Visualisierung der Ergebnisse dem Benutzer, auf Fehler zu reagieren. Die Kosten der Technologie sind dabei sehr gering. Diese Faktoren senken den Aufnahme- und Nachbearbeitungsaufwand erheblich bei gleichzeitigem Mehrwert gegenüber anderen Technologien, wie dem Lasercanning. Setzt man das Verfahren in den dafür geeigneten Bereichen ein, weist es ein sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis auf.

7.2.4 Virtuelle Lösungsdarstellung und -planung

Die drei vorgestellten Methoden Visualisierung von Standardkomponenten (Abschnitt 4.1.3), Planung der Varianten (Abschnitt 5.1.2) und Visualisierung des Angebots (Abschnitt 6.1.3) wurden in einem AR-System, der virtuellen Lösungsdarstellung und -planung als drei aufeinander aufbauende Module AR-Standard, AR-Variantenplanung und AR-Angebotsvisualisierung umgesetzt und evaluiert.

Die Evaluation des AR-Systems erfolgte im Praxiseinsatz. Ein Generalauftragnehmer plante eine Abgasnachbehandlungsanlage in ein vorhandenes Schiff ein. Das AR-System wurde für die Darstellung, die Planung unterschiedlicher Varianten und die Auswahl der Lösung verwendet. Dabei kamen beide implementierten Trackingverfahren (markerbasiert und hybrides Verfahren) zum Einsatz. Als Referenz der Evaluation dient die Erläuterung der gleichen Sachverhalte mit konventionellen Technologien. Der Generalauftragnehmer hat dem Kunden die neuen Komponenten zunächst auf Zeichnungen, anschließend in CAD und als 3D-PDF dargestellt. Bei den ersten beiden Verfahren gab es von Seiten des Kunden keine Nachfragen und er stimmte sowohl den Komponenten und der Einbauposition uneingeschränkt zu. Die Beobachtung der Kundenreaktion hat ergeben, dass bei der Darstellung über 3D-PDF die Kundenintegration zugenommen hat, da er durch Drehen des Objekts versucht hat, bessere Einblicke in die Gesamtsituation zu bekommen. Die beste Kundenintegration konnte für die AR-Präsentation vermerkt werden: Der Kunde nutzte nach kurzer Einführung intensiv die Funktionen des Prototypen. Er betrachtete die neuen Komponenten aus unterschiedlichen Perspektiven und es entstand eine Diskussion zwischen den einzelnen Vertretern des Kunden. Der Kunde identifizierte Probleme bei der Zugänglichkeit für die spätere Wartung. Er hat eine Umpassung der Komponenten angeregt, die der Generalauftragnehmer direkt ausführen und darstellen konnte. Unterteilt nach den angeführten Kriterien ergibt sich folgende Bewertung für das AR-System:

BK1 (Funktionalität): Die Evaluation hat gezeigt, dass das System die geforderten Funktionalitäten erfüllt: Es erlaubt eine Darstellung und Planung der neuen Komponenten direkt am Objekt, steigert das Verständnis des Kunden und integriert ihn in die Lösungsfindung. Sowohl der Generalauftragnehmer und der Kunde konnten das AR-System bedienen. Damit ist es von verschiedenen Benutzern verwendbar

und robust. Der Kunde kann sich selber mit dem Tablet-Computer in der Umgebung bewegen und die geplanten Umbaumaßnahmen aus unterschiedlichen Blickrichtungen betrachten. Eine Einschränkung der Funktionalität liegt im Tracking: Die Anwendung des Systems an realen Beispielen zeigte einige Trackingungenauigkeiten. Einige Bauteile verlassen schnell das Bild, dies liegt zum einen an der Größe der Tablet-Computer und zum anderen am Öffnungswinkel der Kamera. Der Benutzer macht daraufhin in der Regel schnelle Bewegungen mit dem Gerät. Solche schnellen, ruckartigen Bewegungen, besonders unerfahrener Benutzer, führen zu Problemen – die Modelle fangen an sich unnatürlich im Bild zu bewegen.

Ein weiteres Kriterium ist die mögliche Imagewirkung des AR-Systems. Der Imagegewinn ist als hoch einzustufen. Der Generalauftragnehmer erscheint innovativ und als Vorreiter.

BK2 (Flexibilität): Das System ist für viele Einsatzzwecke geeignet. Der modulare Aufbau erlaubt einen Einsatz an mehreren Stellen im Prozess und beginnt bei einer nur geringen Datengrundlage (nur die neuen Komponenten vorhanden) und geht bis zur kompletten Datenbasis (komplettes Geometriemodell der Umgebung, modellierte Montagepfade). Dies beeinflusst jedoch nur die Informationen und nicht die Funktionalität. Bereits ohne Vorkenntnisse der Umgebung kann das System Komponenten einblenden. Der modulare Aufbau erlaubt eine Skalierbarkeit durch weitere Module und eine Anpassung an unterschiedliche Problemstellungen.

BK3 (technologischer Reifegrad): Das AR-System arbeitet zuverlässig. Es konnte sehr unterschiedliche Modelle des Generalauftragnehmers visualisieren und auch unter widrigen Bedingungen (Regen, enge Raumverhältnisse) eingesetzt werden. Fehlbedienung des Benutzers fängt das System durch ein Zwischenspeichern der Konfigurationen ab. Mögliches Weiterentwicklungspotenzial liegt in der Verbesserung des Trackings des Systems.

BK4 (Kosten-Nutzen-Verhältnis): Der Aufwand, das AR-System vor Ort einzusetzen ist gering. Der Generalauftragnehmer konstruiert die Komponenten und Varianten in CAD – sie liegen also bereits vor. Diese Daten und die nach Prozessfortschritt vorhandenen Umgebungsinformationen und Montagepfade importiert er direkt in das System. Auf der Nutzenseite erlaubt es das System, den Kunden in die Lösungsfindung und -bewertung einzubinden. Dies erspart dem Benutzer zumindest den Aufwand, Änderungen des Kunden durch bspw. zusätzliche Aufzeichnungen oder Einträge in Zeichnungen zu dokumentieren. Im besten Fall erhöht es die Auftragswahrscheinlichkeit. Obwohl für den Generalauftragnehmer Kosten durch den Einsatz des Systems entstehen, erscheint der Nutzen größer, sodass das Kriterium positiv zu bewerten ist.

7.2.5 ViP-Toolset Ergonomie

Das Ergonomiemodul des ViP-Toolsets ermöglicht es dem Benutzer, ergonomisch kritische Stellen der Lösung aufwandsarm abzusichern. Als Input für die Absicherung liegen dem Benutzer eine Auflistung der ergonomisch kritischen Bereiche und die dort betrachteten Tätigkeiten vor. Das Ergonomiemodul wurde in einer virtuellen Testumgebung (CAD-Modell eines komplexen Investitionsguts) für mehrere Tätigkeiten an unterschiedlichen Stellen im Modell evaluiert. Die Bewertung erfolgt nach den vier Kriterien:

BK1 (Funktionalität): Die Ergonomie-Erweiterung des ViP-Toolsets ermöglicht eine einfache Vorbereitung des virtuellen Menschmodells und eine zielgerichtete Durchführung. Die Erweiterung erfüllt die geforderten Funktionen. Die durchzuführenden Schritte schließen direkt an einander an und erlauben dadurch kaum Fehler in der Bedienung.

BK2 (Flexibilität): Eine Übertragbarkeit der Ergonomie-Erweiterung auf andere Problemstellungen ist gegeben. Die Vorbereitung ist unabhängig von den Objekten und somit bei vielen unterschiedlichen Absicherungen einsetzbar. Die einzelnen Schritte ermöglichen den Einsatz weiterer Hilfsmittel, wie dem Personentracking für die Einnahme spezieller Haltungen. Für die Durchführung sind die Kraftdatenbanken austauschbar. Dadurch kann der Benutzer beliebig komplexe Analysen mit dem Verfahren durchführen.

BK3 (technologischer Reifegrad): Das Konzept berücksichtigt eine Verwendung mit mehreren virtuellen Menschmodellen für die Absicherung komplizierter Montagetätigkeiten und kann dementsprechend erweitert werden. Die Zuverlässigkeit der Ergonomie-Erweiterung ist hoch, da die Analysen auf dem Abgleich zwischen direkt messbaren Faktoren (bspw. Knickwinkel des Ellenbogens) und maximal zulässigen Grenzwerten basieren (bspw. Ergonomiestandards).

BK4 (Kosten-Nutzen-Verhältnis): Liegen ergonomisch kritische Bereiche vor, senkt die Ergonomie-Erweiterung des ViP-Toolsets den Aufwand gegenüber anderen Methoden, das virtuelle Menschmodell vorzubereiten. Die Anbindung der Kräfterdatenbank ermöglicht es erst, eine Tätigkeit zu bewerten und bietet damit einen sehr hohen Nutzen für den Benutzer. Davon kann der Generalauftragnehmer jedoch nur profitieren, wenn er bereits die dafür notwendige VR-Umgebung hat. Eine Investition in ein solches System nur für die Bewertung ergonomisch kritischer Bereiche in der Angebotserstellung ist in der Regel nicht profitabel. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis muss damit differenziert betrachtet werden. Für viele Anwender ist es negativ zu bewerten, sollte ein solches System jedoch vorliegen, ist es sehr gut.

7.2.6 Fazit

Die Einzelevaluation der Werkzeuge zeigt, dass die entwickelten Hilfsmittel für einen Praxiseinsatz grundsätzlich geeignet sind. Alle Werkzeuge wurden dafür nach vier Kriterien bewertet. Jedes Kriterium wurde mindestens teilweise erfüllt. Abbildung 7-8 stellt die Bewertung aller Werkzeuge dar.

Bewertungskriterium \ Werkzeug	BK 1 Qualität / Funktionalität	BK 2 Flexibilität	BK 3 technologischer Reifegrad	BK 4 Kosten-Nutzen- Verhältnis
Prozesskonfigurator	●	●	●	●
Frühabschätzungstool	●	●	●	●
Mobile Aufnahmeplattform	◐	●	◐	●
AR-System	◐	●	●	●
ViP-Ergonomie	●	●	●	◐

- vollständig erfüllt
- ◐ überwiegend erfüllt
- ◑ teilweise erfüllt

12923

Abbildung 7-8: Bewertung technologischer Werkzeuge

Die nicht vollständig erfüllten Kriterien stellen die Einsatzgrenzen der Prototypen dar. Die Flexibilität des Frühabschätzungstools ist für die hier betrachteten Branchen gegeben und eine Erweiterung für weitere Branchen ebenfalls möglich, allerdings aufwendig. Die Grenzen der Mobilen Aufnahmeplattform und des AR-Systems sind durch die verwendete Hardware bedingt. Diese entwickeln die Hersteller kontinuierlich weiter. Daher ist von einer deutlichen Verbesserung der hier vorgestellten Bewertung in Zukunft auszugehen. Die Werkzeuge sind bereits jetzt für die hier betrachteten Einsatzszenarien einsetzbar.

Eine Besonderheit stellt das Ergonomiemodul des ViP-Toolsets dar. Es setzt eine kostenintensive VR-Umgebung voraus. Da viele Unternehmen ein solches System nicht besitzen, ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis nur als teilweise erfüllt bewertet.

7.3 Anwendungsbeispiel: Umbau einer Fähre

Die Bewertung des entwickelten Konzepts mit dem Einsatz der Methoden und Werkzeuge erfolgt anhand der beiden Kriterien Produktivität und Qualität des Angebots. Dafür vergleicht die Arbeit den entwickelten Prozess mit einem Referenzprozess mit ähnlichen Rahmenbedingungen. Der Output beider Prozesse ist ein Angebot für den Umbau eines komplexen Investitionsguts. Die Arbeit vergleicht die Produktivität daher anhand des investierten Aufwands. Ziel ist eine signifikante Reduzierung dieses Aufwands. Die Bewertung der Qualität erfolgt quantitativ und qualitativ ebenfalls am Vergleich der Prozesse. Die quantitative Betrachtung nimmt

die Arbeit über einen Vergleich der späteren Umbaukosten vor. Für die qualitative Betrachtung bewertet sie die Rückmeldungen des Generalauftragnehmers.

Abschnitt 7.3.1 stellt zunächst das Praxisbeispiel vor und erläutert die Problemstellung und die Ausgangssituation. Abschnitt 7.3.2 beschreibt die Anwendung des entwickelten Prozesses an dem Praxisbeispiel, bevor Abschnitt 7.3.3 das Projekt bewertet und mit einem Referenzprozess vergleicht.

7.3.1 Ausgangssituation

Immer strengere Umweltvorschriften zwingen Reeder, ihre Emissionen stetig zu reduzieren. Die International Maritime Organisation (IMO) regelt bspw. in der Richtlinie IMO Marpol Annex VI den maximalen Ausstoß von Stick- und Schwefeloxiden von Schiffen über die nächsten Jahre (Abbildung 7-9). Die Richtlinie unterscheidet dabei zwischen globalem Gewässer und der Emission Control Area (ECA). In diesen Bereichen gelten besonders strenge Vorschriften. Um diese Vorschriften einzuhalten, stehen den Reedern drei Möglichkeiten zur Verfügung:

- der Betrieb mit schwefelarmen Kraftstoff
- der Umbau der Motoren auf den Betrieb mit Liquid Natural Gas (LNG)
- die Nachrüstung von Abgasnachbehandlungsanlagen

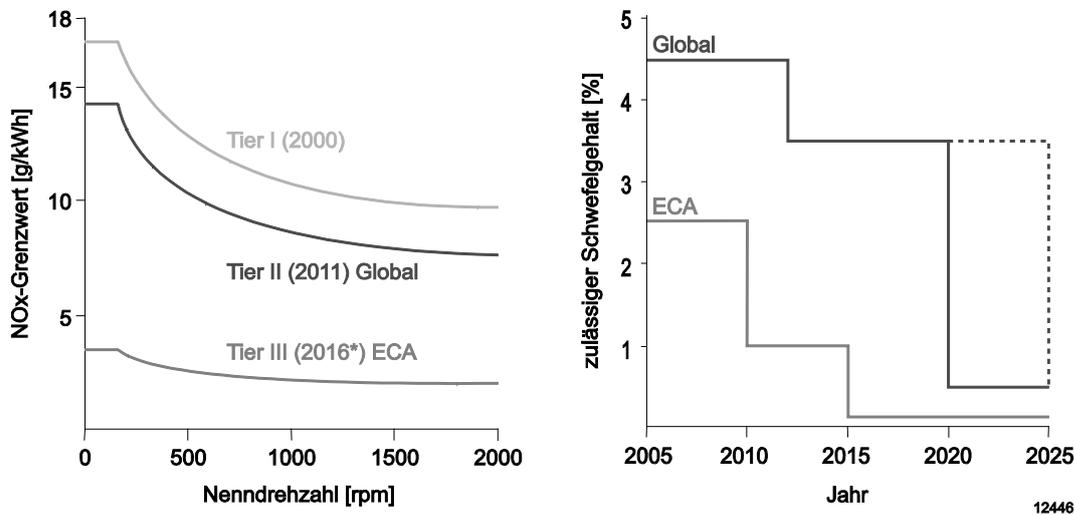


Abbildung 7-9: Stick- und Schwefeloxid-Grenzwerte [IMO05]

Die Entscheidung hängt unter anderem vom Fahrtgebiet des Schiffes und der Aufenthalttdauer in den ECAs ab.

Für die Evaluation wurde eine Reederei gewählt, die schwerpunktmäßig in der Nord- und Ostsee verkehrt. Beide Gewässer sind als ECA klassifiziert und unterliegen demnach besonders strengen Abgaswerten. Die Reederei (Kunde) hat ein Zulieferunternehmen (Generalauftragnehmer) beauftragt, ein Angebot für die Nachrüstung einer Abgasnachbehandlungsanlage zu erstellen. Als Verfahren wählte der Kunde die Selective Catalytic Reduction (SCR) für die Reduktion von Stickoxiden im Abgas. Eine SCR-Anlage sollte in das Abgassystem einer Fähre integriert werden.

Für die Erstellung des Angebots wurde der entwickelte Prozess durchlaufen. Die vorgestellten Methoden und Werkzeuge wurden zunächst angepasst und im Prozess an den entsprechenden Stellen eingesetzt. Ein von dem Generalauftragnehmer früher durchgeführtes Projekt, ebenfalls die Nachrüstung einer SCR-Anlage auf einem ähnlichen Schiff, diente als Referenz für die spätere Bewertung des neuen Prozesses.

7.3.2 Angebotserstellung

Datenaufbereitung

Der Generalauftragnehmer hat mit Hilfe des Fragebogens (Abschnitt 4.1.2) alle für das Projekt relevanten Informationen beim Kunden erfragt. Der Kunde machte allgemeine Angaben zum Auftragsgegenstand, Angaben zum Schiff, Angaben über sich, technische Informationen und Rahmenbedingungen. Zudem stellte er Pläne und Zeichnung der Fähre bereit. Weitere Vorgaben waren die umzubauende Werft, der Werfttermin und die Route des Schiffs. Letztere ist eine festgelegte Route innerhalb der Nord- und Ostsee mit drei Häfen und einer Umschlagszeit von etwa sechs Stunden.

Anhand dieser Daten plante der Generalauftragnehmer die Angebotserstellung. Dafür benutzte er den Prozesskonfigurator (Abschnitt 4.1.4). Zunächst nahm er eine Vorkonfiguration vor. In der Datenaufbereitung verzichtete der Generalauftragnehmer auf den Schritt der 3D-Modell-Nachbearbeitung und in der Lösungsfindung und Ergebnisbereitstellung auf mehrere einzelne Outputs. Abbildung 7-10 stellt den angepassten Prozessablauf dar. Im nächsten Schritt, der Terminierung passte der Generalauftragnehmer die Daten für den Prozess an und terminierte automatisiert den Prozess. Ein Export war an dieser Stelle nicht erforderlich, da er kein weiterführendes Projektmanagementwerkzeug eingesetzt hat.

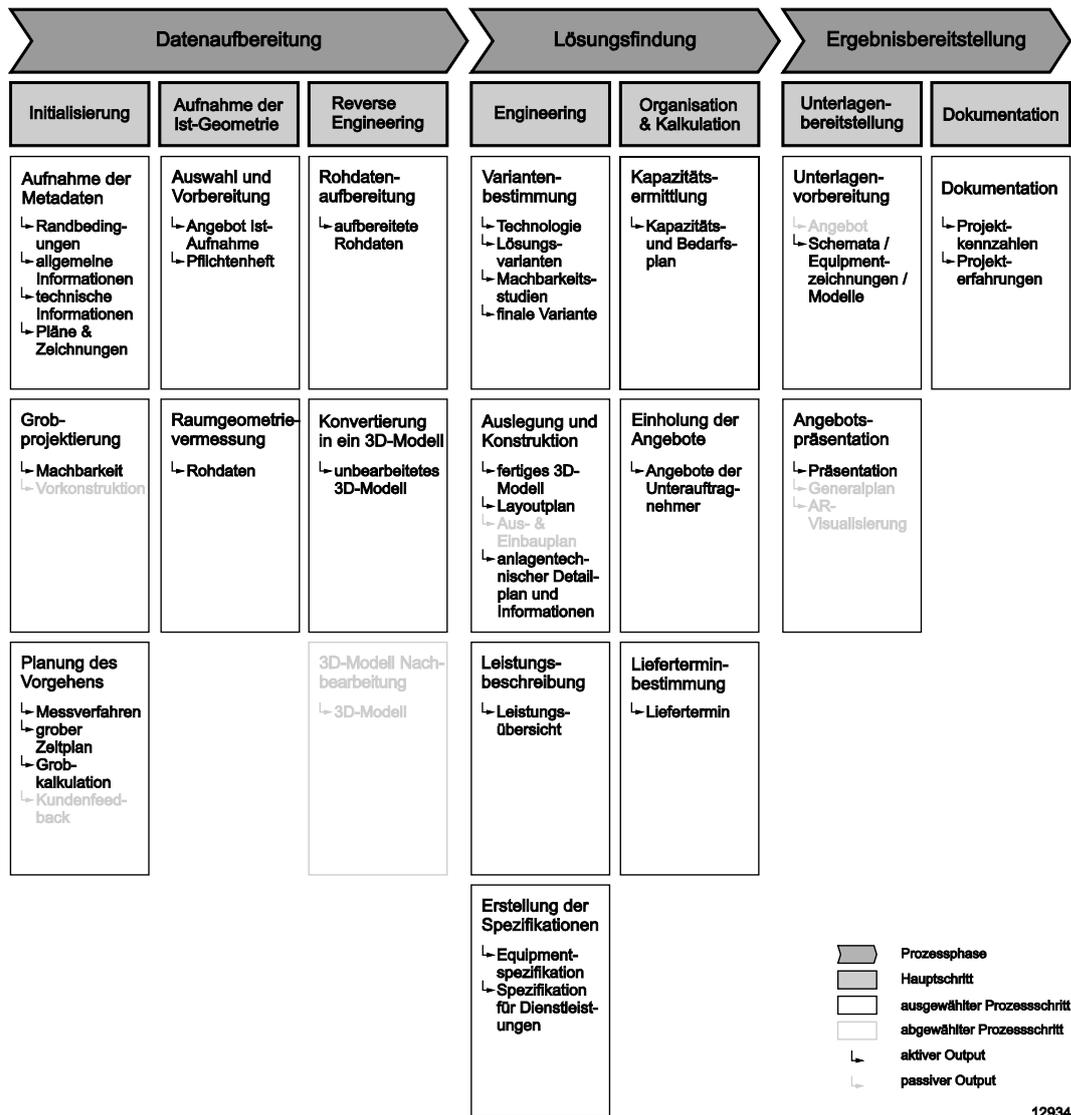


Abbildung 7-10: Angepasster Prozessplan für den Umbau einer Fähre

Die vom Kunden bereitgestellten Generalpläne waren für eine detaillierte Planung der neuen Komponenten nicht ausreichend. Die SCR-Anlage besteht aus mehreren Teilen, die der Generalauftragnehmer in unterschiedlichen Bereichen integrieren muss. Eine Aufnahme und Aufbereitung der Ist-Geometrie war damit erforderlich. Zunächst bereitete der Generalauftragnehmer die Vermessung vor. Dafür klassifizierte er das zu vermessende Schiff in die vier AOI-Bereiche (Abbildung 7-11, vgl. Abschnitt 4.2.2).

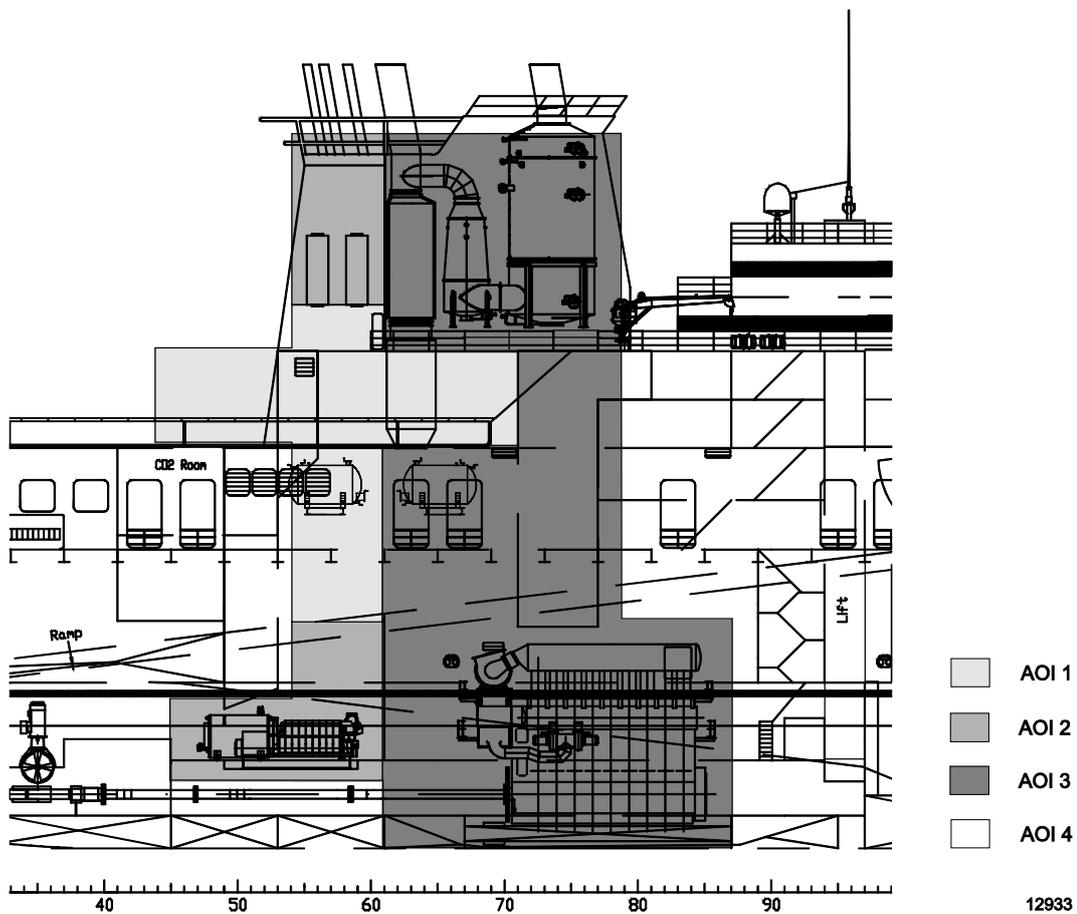


Abbildung 7-11: Klassifizierung der AOI-Bereiche einer Fähre

Die definierten AOI-Bereiche benutzte der Generalauftragnehmer für die Planung der Vermessung und die Wahl der richtigen Aufnahmetechnologie. Das Frühabschätzungstool ermittelte das Laserscanning als geeignete Technologie und errechnete für die Vermessung eines Teils des Abgasschachts eine Aufnahmedauer von 47 Minuten. Nach der Planung erfolgte die eigentliche Vermessung der Fähre. Die tatsächliche Aufnahmedauer des Abgasbereichs lag bei 51 Minuten. Das hat die Funktionalität der hergeleiteten Zusammenhänge zusätzlich nachgewiesen. Insgesamt konnte das Schiff in der vorgegebenen Zeit von sechs Stunden in allen relevanten Bereichen vermessen werden.

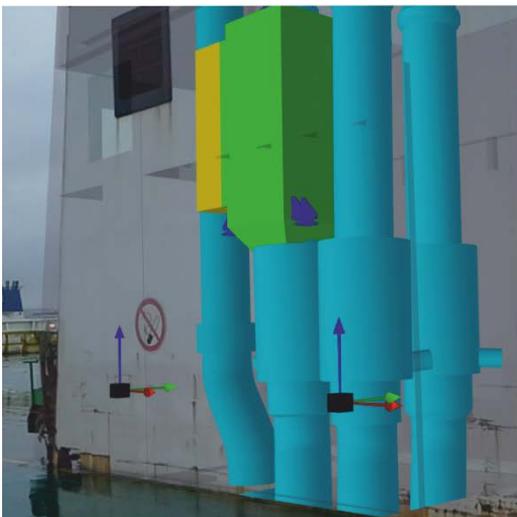
Aufbauend auf der AOI-Klassifizierung erstellte der Generalauftragnehmer ein bereichsorientiertes Lastenheft für die Definition der geforderten Modelle aus der Vermessung (vgl. Abschnitt 4.3.2). Das Nachmodellieren der Umgebung ist eine Dienstleistung, die der Generalauftragnehmer vergeben hat. Das Lastenheft diente dabei dem späteren Abgleich der Forderungen und der Abrechnung. Der Generalauftragnehmer und der Dienstleister bewerteten das Lastenheft als ein sehr nützliches und hilfreiches Werkzeug. Aus ihrer Sicht waren alle relevanten Informationen

enthalten und dadurch konnten Nachfragen reduziert werden. Die rekonstruierten Modelle dienten als Planungsgrundlage für die anschließende Lösungsfindung.

Lösungsfindung

Im ersten Schritt der Lösungsfindung entwickelte der Generalauftragnehmer Lösungsalternativen und konstruierte sie in das Planungsmodell ein. Die Hauptkomponente einer SCR-Anlage ist der SCR-Katalysator. Dieser wurde in das Abgasrohr integriert. Die Größe des Katalysators, Lage und Orientierung sind dabei innerhalb bestimmter Grenzen flexibel. Weitere Komponenten sind bspw. ein Ureatank und ein Schaltschrank. Diese sind weitestgehend flexibel platzierbar.

Der Generalauftragnehmer visualisierte mit der AR-Variantenplanung dem Kunden die unterschiedlichen Varianten direkt am Objekt und schaffte dadurch einerseits Transparenz über das neue System, andererseits diente es als Diskussionsplattform. Die unterschiedlichen Darstellungsmodi unterstützten diesen Effekt (Abbildung 7-12). Neben der normalen Darstellung hat der Generalauftragnehmer eine Darstellung als Röntgenblick vorbereitet. Letztere schaffte eine gute Übersicht und ermöglichte eine Betrachtung von außerhalb des Objekts.



a) Augmented Reality als Röntgenblick mit Umgebungsinformationen



b) in einem Abgasschacht mit Umgebungsinformationen

12574

Abbildung 7-12: Variantenplanung mit AR [Tito14]

Der Kunde erkannte bei der Vorstellung Probleme wie die Zugänglichkeit zu den Wartungsbereichen des SCR als problematisch, der Generalauftragnehmer modifizierte die Orientierung daraufhin direkt vor Ort. In den nachfolgenden Schritten konstruierte der Generalauftragnehmer die gefundene Variante aus und sicherte sie

ab. Abbildung 7-13 stellt die Bewertungstabelle ergonomischer Aspekte für drei Tätigkeiten exemplarisch vor:

- Tätigkeit 1 ist das Ausbrennen eines Lochs in die Außenwand des Schornsteins (geplanter Aufwand 9 Std.).
- Tätigkeit 2 ist die Demontage vorhandener Abgasrohre (geplanter Aufwand 20 Std.).
- Tätigkeit 3 ist das Schweißen der Mischstrecke (geplanter Aufwand 8 Std.).

Die dominierende Haltung der Montagearbeiter schätzte der Generalauftragnehmer aus der vorhandenen Umgebung ab und bewertete diese. Der Zugang ergibt sich ebenfalls aus der umliegenden Geometrie. Tätigkeit 1 ist aus ergonomischer Sicht unkritisch, die Tätigkeiten 2 und 3 sind als Level II klassifiziert und weisen demnach moderate ergonomische Belastungen auf. Eine Detailanalyse war an dieser Stelle demnach nicht erforderlich.

			Aufgabe			
			Loch ausbrennen	Demontage Abgasrohr	Schweißen Mischstrecke	
			Ergebnis			
Dauer (D) [min]	0 ≤ 11		1	1	2	1
	12 ≤ 40		2			
	40 <		3			
Haltung (H)	Rumpf (R)	neutral	1	1	1	1
		nicht neutral	2			
		schwer	3			
	Beine (B)	neutral	1	1	3	3
		nicht neutral	2			
		keine Stütze	3			
	Arme (A)	neutral	1	1	1	3
		gestreckt	3			
	Summe			3	5	7
	Auswertung 3-5 neutral H = 1 6-7 nicht neutral H = 2 8-9 schwer H = 3			1	1	2
Zugang (Z)	zu Fuß, stehend		1	2	3	3
	kriechen, gestreckt		2			
	Klettergurt, Leiter		3			
Gesamtnote			4	6	6	
Klassifizierung: Level I: Endergebnis von 8-9 Level II: Endergebnis von 5-7 Level III: Endergebnis von 3-4			III	II	II	

12835

Abbildung 7-13: Exemplarische Bewertung ergonomischer Aspekte von Montagetätigkeiten

In den nachfolgenden Schritten spezifizierte der Generalauftragnehmer die Leistungen und erstellte ein Leistungsverzeichnis. Abschließend holte er Angebote von externen Unterauftragnehmern ein. Die vom Kunden vorgegebene Werft war dabei erster Ansprechpartner und schränkte den Generalauftragnehmer in der Wahl ein.

Ergebnisbereitstellung

In der letzten Prozessphase finalisierte der Generalauftragnehmer die Unterlagen und stellte sie dem Kunden bereit. Die AR-Angebotsvisualisierung stellte die SCR-Anlage final an einem der Abgasrohre dar. Zudem zeigte es die Montagepfade in Form von Animationen (Abbildung 7-14). Der Umbau sollte über die Außenwand des Schornsteins erfolgen. Die Werker sollten den SCR-Katalysator von außen über ein Loch an das richtige Rohr heran bringen und montieren. Diese Visualisierung erleichterte das Verständnis des Kunden und schaffte Transparenz über die Maßnahmen.

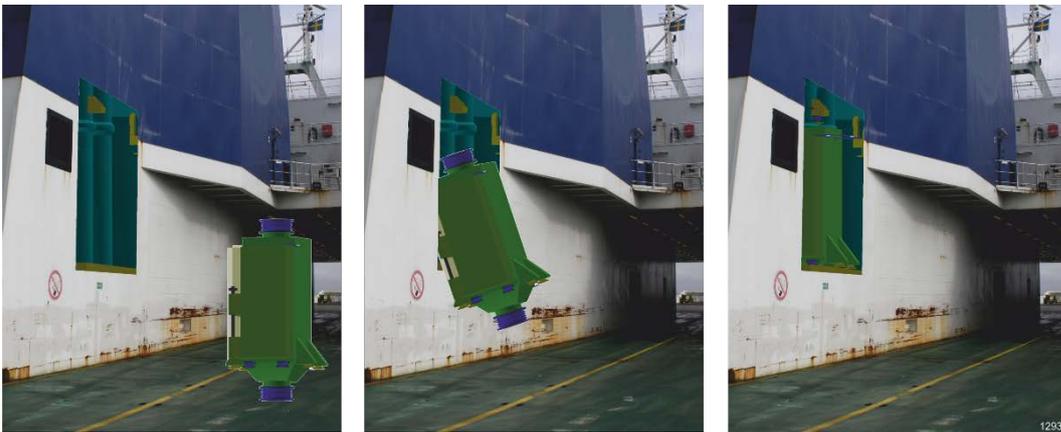


Abbildung 7-14: Montage des SCR-Katalysators

Um das Projekt zu verfolgen, setzte der Generalauftragnehmer die in Abschnitt 6.2.2 vorgestellten Kosten-Kurven ein. Das zur Evaluation verwendete Referenzprojekt lieferte die Plan-Werte für die Projektterminierung (Abbildung 7-15). Die Durchlaufzeit des Angebots des Referenzprojekts lag nicht vor, deshalb ist die Zeit relativ dargestellt. Der Fertigstellungswert zum Abschluss des Projekts entspricht den Plankosten, da das Angebot vollständig an den Kunden zum Termin übergeben werden konnte und alle Projektschritte bearbeitet wurden. Daraus ergibt sich eine abschließende terminbezogene Abweichung von null. Die eingetragene kostenbezogene Abweichung ist positiv zu interpretieren – die Angebotserstellung des neuen Prozesses hat Kosten eingespart.

Die Aufnahme der Kurven erfolgte auf Basis der Projektteilschritte. Der Einsatz der Kurven hat gezeigt, dass sie für die Problemstellung prinzipiell geeignet sind.

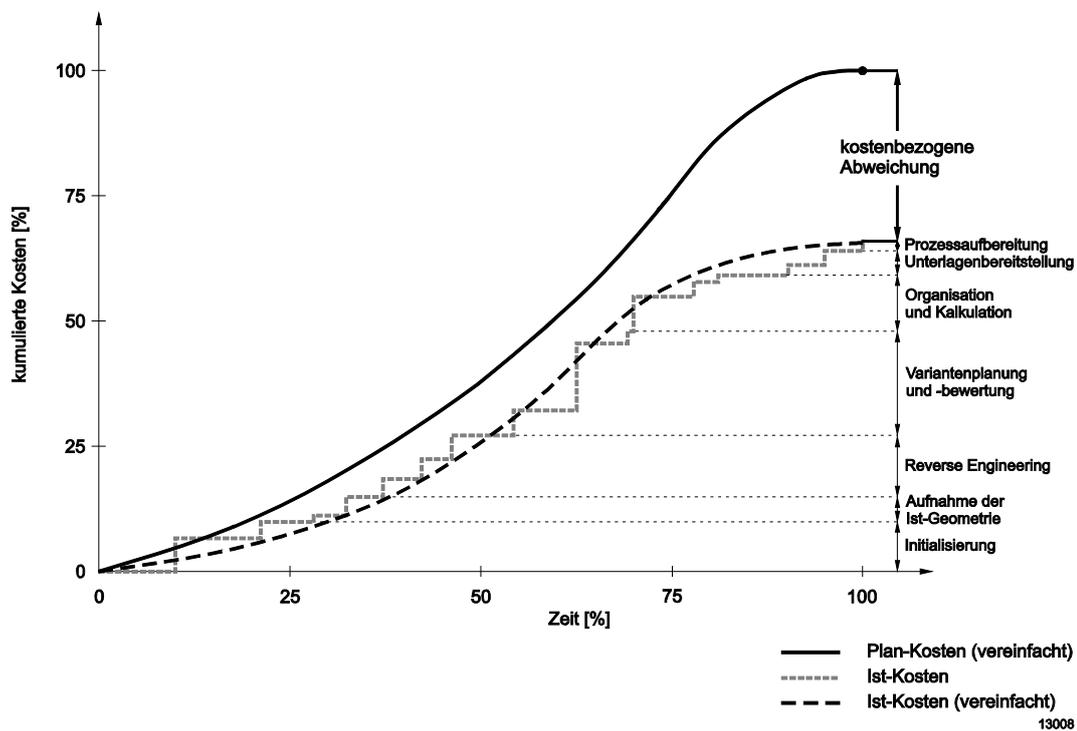


Abbildung 7-15: Evaluation des Angebotserstellungsprozesses

7.3.3 Bewertung

Eine Bewertung des Angebotserstellungsprozesses erfolgt an einem Vergleich des vorgestellten Beispiels mit einem Referenzprozess. Zunächst bewertet die Arbeit dazu die Produktivität und anschließend die Qualität des neuen Prozesses. Die vorliegenden Rahmenbedingungen sind vergleichbar. Der Auftragsgegenstand des Referenzprozesses ist ebenfalls eine Nachrüstung einer SCR-Anlage in einem Schiff. Der Generalauftragnehmer ist in beiden Prozessen das gleiche Unternehmen.

Produktivität

Der neue Prozess konnte den Aufwand für die Erstellung des Angebots in dem beschriebenen Beispiel um insgesamt 36% im Vergleich zum Referenzprozess senken (Abbildung 7-16). Der Aufwand konnte in einzelnen Teilprozessschritten, die durch neu entwickelte Werkzeuge unterstützt werden, zum Teil besonders stark gesenkt werden: Auswahl und Vorbereitung der Aufnahme (-75%), Variantenbestimmung (-42%).

Die Evaluation erfolgte an nur einem Vergleich, da die Durchlaufzeit solcher Angebote hoch und die Anzahl der Anfragen bei einem Generalauftragnehmer verhältnismäßig gering ist. Die aufgeführten Verbesserungen zeigen, dass der entwickelte Prozess mit den Werkzeugen das Potenzial haben die Produktivität zu steigern, es

fehlt jedoch eine statistische Absicherung. Dies war im Rahmen der Arbeit nicht möglich. Um die Verlässlichkeit der gemessenen Verbesserungen zu bestätigen, müssen daher weitere Projekte durchgeführt werden.

	Einheit	Referenzschiff	Fähre
Technologie		SCR	SCR
Gesamtplanungsaufwand	%	100	77,8
Anteil des Angebots an der Gesamtplanung	%	50,5	41,5
absoluter Angebotsaufwand	%	100	63,9
absoluter Umbauaufwand	%	100	95

12943

Abbildung 7-16: Evaluation des Angebotserstellungsprozesses

Qualität

Die Bewertung der Angebotsqualität erfolgt quantitativ und qualitativ. Der absolute Umbauaufwand der Fähre ist mit dem Umbauaufwand des Referenzschiffs vergleichbar. Die Umbauwerft war dabei eine andere, Lerneffekte der Werker sind deshalb auszuschließen. Die Planungsgrundlage weist dementsprechend mindestens die gleiche oder eine verbesserte Qualität auf.

Für die qualitative Bewertung verwendet die Arbeit die Rückmeldung des Generalauftragnehmers zu dem Prozess und den Werkzeugen. Der systematische Prozess erleichtert die Angebotserstellung. Einen dauerhaften Einsatz in der Praxis befürworten sowohl der Evaluationspartner als auch die an der Evaluation der Einzelwerkzeuge beteiligten Personengruppen (Kunde, Vermessungsdienstleister, Zulieferer). Besonders das systematische Vorgehen zur Erfassung der Ist-Geometrie in einem frühen Prozessstadium und die Integration des Kunden an definierten Stellen im Prozess haben dem Generalauftragnehmer dazu verholfen, die Qualität des Angebots zu verbessern und damit die Auftragswahrscheinlichkeit zu steigern.

Das Anwendungsbeispiel hat gezeigt, dass der Angebotserstellungsprozess für die hier vorliegende Fragestellung geeignet ist. Die entwickelten Werkzeuge unterstützen den Generalauftragnehmer bei der Bearbeitung und ermöglichen eine Reduzierung des Aufwands der Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter.

8 Schlussbetrachtung

Das vorliegende Kapitel fasst in Abschnitt 8.1 die Ergebnisse der einzelnen Kapitel zusammen und gibt in Abschnitt 8.2 einen Ausblick auf weitere Forschungsfelder sowie Verbesserungen des Verfahrens.

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Konzept zur Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter. Die wichtigsten Ziele sind, eine hohe Produktivität und eine hohe Qualität des Angebots zu gewährleisten. Um diese Ziele zu erfüllen, leitet die Arbeit unterschiedliche Methoden und Werkzeuge her und integriert sie in das Konzept.

Verschiedene Umbaumaßnahmen sollen die Lebensdauer eines Produkts erweitern, die Umweltbilanz verbessern oder die Produktivität des Produkts steigern. Bei komplexen Investitionsgütern, wie Schiffen, Gebäuden oder Industrieanlagen, sind Umbaumaßnahmen sehr komplex und auftragsspezifisch. Sie nehmen einen großen Anteil der gesamten Produktlebenskosten ein (Kapitel 2). Ein Angebot für eine Umbaumaßnahme stellt für den Generalauftragnehmer eine besondere Herausforderung dar. Es ist ein aufwändiger Prozess und die geringe Auftragswahrscheinlichkeit erfordert ein effizientes Vorgehen und ein qualitativ hochwertiges Ergebnis.

Ein wichtiges Ziel der Arbeit ist es, die Auftragswahrscheinlichkeit zu erhöhen. Dafür entwickelt sie einen standardisierten Prozess für die Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, der die hohen Anforderungen an die Produktivität und die Qualität erfüllt (Kapitel 3). Der Prozess ist generisch und modular aufgebaut und besteht aus den drei Phasen Datenaufbereitung, Lösungsfindung und Ergebnisbereitstellung. Jede Phase ist in Prozessschritte und Teilschritte unterteilt. Letzteren ordnet die Arbeit Inputs und Outputs zu. Der Prozess ist anpassbar und ermöglicht es, die notwendigen Schritte anhand von Kriterien und Vorgaben des Kunden zu definieren. Der hier entwickelte Angebotserstellungsprozess erweitert die in der Industrie verbreitete VDI-Norm 4504 zur Angebotserstellung um Umbauprojekte.

Als eine besondere Herausforderung des Prozesses identifiziert die Arbeit die Datenaufbereitung. Der Generalauftragnehmer erfasst neben den Kundenvorgaben alle weiteren relevanten Daten vom vorhandenen Objekt (Kapitel 4). Darauf aufbauend erstellt er die Planungsgrundlage für das gesamte Umbauprojekt. Da dies noch vor der Annahme des Angebots geschieht, ist das Ziel, den Aufwand auf ein Minimum zu reduzieren. Die Arbeit entwickelt mehrere Methoden und Werkzeuge, die den Generalauftragnehmer dabei unterstützen, alle benötigten Daten möglichst

aufwandsarm zu erfassen und das Planungsmodell zu erstellen. Ein zentrales Werkzeug stellt die Mobile Aufnahmeplattform dar. Diese nimmt die Ist-Geometrie auf, gibt dem Benutzer eine visuelle Rückmeldung und integriert bereits Nachbearbeitungsschritte in die Vermessung. Die Arbeit hat gezeigt, dass die Mobile Aufnahmeplattform für bestimmte Umgebungen komplexer Investitionsgüter gut geeignet ist, allerdings noch nicht das gesamte Spektrum produktiv abdecken kann.

In der Lösungsfindung entwickelt der Generalauftragnehmer verschiedene Umbauvarianten und bewertet sie (Kapitel 5). Als entscheidende Kriterien in der Auswahl der Lösung identifiziert die Arbeit die Integration des Kunden in den Bewertungsprozess und die Absicherung der Lösung. Sie entwickelt ein Augmented-Reality-System, um dem Kunden die Lösungsalternativen verständlich zu vermitteln und ihn in die Lösungsfindung zu integrieren. Weiterhin entwickelt die Arbeit Methoden zur aufwandsarmen Bewertung und Absicherung der Lösung und betrachtet dafür hauptsächlich deren ergonomische Eigenschaften. Die Evaluation dieser Werkzeuge hat eine produktive Verwendung in der Praxis bestätigt.

Die Ergebnisbereitstellung stellt alle Inhalte für den Kunden bereit und visualisiert die Maßnahmen (Kapitel 6). Die Arbeit leitet unterstützende Methoden her und diskutiert die Dokumentation der Angebotserstellung. Ein Augmented-Reality-System visualisiert die Inhalte des erarbeiteten Angebots in verständlicher Form für den Kunden. Weiterhin wurden Kennzahlen für die Projektverfolgung definiert. Diese Kennzahlen stellen eine einfache Möglichkeit des Projektcontrollings bereit.

Die Evaluation der einzelnen Methoden und Werkzeuge belegt die Funktionalität und bewertet sie nach mehreren Kriterien (Kapitel 7). Ein Anwendungsbeispiel aus der Praxis nutzt den erstellten Prozess sowie die dafür entwickelten Werkzeuge und zeigt eine deutliche Erhöhung der Produktivität. Das gesamte Vorgehen führt zu transparenten Maßnahmen, integriert den Kunden in den Angebotserstellungsprozess und liefert eine hohe Angebotsqualität.

8.2 Ausblick

Diese Arbeit leitet ein grundsätzliches Konzept sowie notwendige Methoden und Werkzeuge zur Angebotserstellung für den Umbau bereits existierender Produkte her. Im Hinblick auf die weitere Entwicklung sind vier Forschungsfelder besonders interessant: Die Übertragung des Konzepts auf die anschließende Detailplanung, die Aufnahme der Geometrie und anschließende Erzeugung eines Planungsmodells, die skalierbare Bewertung und Absicherung von Montagetätigkeiten und die Projektsteuerung über Kennzahlen.

Der generische Aufbau der Angebotserstellung in Anlehnung an den Problemlösungszyklus nach Haberfellner bietet das Potenzial, den Prozess in weiteren Bereichen, wie der anschließenden Detailplanung, zu verwenden. Um das Konzept zu

übertragen, müssen Tätigkeiten der Detailplanung genauer betrachtet werden, da sie sich von der Grobplanung deutlich unterscheiden. Da der Prozess der Detailplanung überwiegend ohne die Einbindung des Kunden erfolgt, verschiebt sich der Fokus der Entwicklung auf die Zielgruppe Generalauftragnehmer.

Ein verbessertes Planungsmodell kann durch eine gemeinsame Entwicklung der Verfahren zur Geometrieerfassung und dem Reverse Engineering in einem integrierten Verfahren erfolgen. Die Verfahren müssen dazu die erfasste Geometrie zur Laufzeit modellieren. Das Ergebnis sollte ein fertiges 3D-Modell direkt nach der Aufnahme sein. Eine visuelle Kontrolle der aufgenommenen Daten in Echtzeit ist dafür notwendig, ebenso wie weitergehende Algorithmen zur automatisierten Oberflächenerkennung.

Die Absicherung von Montagetätigkeiten erfordert einen skalierbaren Ansatz. Solche Voranalysen haben das Potenzial Fehler frühzeitig zu erkennen und später auftretende Nacharbeit zu vermeiden. Eine Herausforderung ist es, die Absicherungen produktiv in die Prozesse zu integrieren. Ein skalierbarer Ansatz mit dynamischen Absicherungsumfang und -bausteinen erleichtert es dem Generalauftragnehmer, solche Hilfsmittel zu verwenden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Kennzahlen dienen der Projektverfolgung und geben Hinweise auf problematische Arbeitspakete bzw. Planabweichungen. Ein Kennzahlenmonitor für Umbaumaßnahmen würde eine genauere Betrachtung der einzelnen Arbeitspakete erlauben und standardisierte Gründe für die Verzögerung einzelner Schritte oder Outputs erfassen. Ein solches Kennzahlensystem würde zudem die Möglichkeit eröffnen, Erfahrungen aus Projekten einfacher als bislang auf nachfolgende Aufträge zu übertragen.

Literaturverzeichnis

- ABB13 ABB: Retrofit – Zukunftsträchtiger Baustein im Lifecycle-Management. In: Service Energietechnik, Mannheim, 2013.
- Aert00 Aertker, P.: Europäisches Zulassungsrecht für Industrieanlagen. In: Schriften zum internationalen und zum öffentlichen Recht. Peter Lang, Band 42, Frankfurt am Main, 2000.
- Arch03 Archibald, R. D.: Managing High-Technology Programs and Projects. 3. Auflage, New York, 2003.
- Azum97 Azuma, R. T.: A Survey of Augmented Reality. In: Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6. S. 355-385, Boston, 1997.
- Back92 Backhaus, K.: Investitionsgüter-Marketing. Verlag Vahlen, München, 1992.
- Back03 Backhaus, K.: Industriegütermarketing. Verlag Vahlen, 7. Auflage, München, 2003.
- Bank04 Banki, K.: Kennzahlenkompass. Informationen für Unternehmer und Führungskräfte. VDMA Verlag, Frankfurt, 2004.
- Bare12 Baretta, J.: Ballast Water Treatment Systems: To wait or not to wait – the \$30B Retrofit Challenge. 2012.
- Bart08 Bartsch, F.; Kalusche, W.; Rausch, V.: Geplante Instandhaltung von Gebäuden. In: Forum der Forschung. BTU Cottbus, Eigenverlag, 21/2008, Cottbus, S. 73-80, 2008.
- Baue14 Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- Bett01 Bettoni, M. C.; Baschung, N. S.; Endress, G. A.; Rütli, M. A.: Eine prozeßorientierte Mikro-Logik für praxisnahe Wissensmanagement-Projekte: Grundlagen und Vorgehensmodell. In: Professionelles Wissensmanagement: Erfahrungen und Visionen. Baden Baden, 2001.

- Bock11 Bockholt, U.; Olbrich, M.; Riess, P.; Wuest, H.: Augmented Reality Pipe Layout Planning in the Shipbuilding Industry. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Science and Technology, Proceedings, Basel, 2011.
- Bokr06 Bokranz, R.; Landau, K.; Becks, C.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. MTM-Handbuch. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2006.
- Bren01 Brenner, C.: Automatische Gebäudeerfassung aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. In: Künstliche Intelligenz. Heft 4/01, arendtapVerlag, S. 17-22, Bremen, 2001.
- Buch96 Buchholz, B.; Paquet, V.; Punnett, L.; Lee, D.; Moir, S.: PATH: A work sampling-based approach to ergonomic job analysis for construction and other non-repetitive work. In: Applied Ergonomics, Volume 27, Issue 3, S. 177-187, 1996.
- Bule10 Bulearca, M.; Tamarjan, D.: Augmented Reality: A Sustainable Marketing Tool? In: Global Business and Management Research: An International Journal. Vol. 2, S. 237-252, 2010.
- Bung07 Bungenberg, M.: Vergaberecht im Wettbewerb der Systeme. Mohr Siebeck Verlag, Tübingen, 2007.
- Busc11 Busch, I.: Königsdisziplin Modernisierung. In: Instandhaltung, Sonderausgabe Retrofit, S. 3, 2011.
- Choi10 Choi, C.; Christensen, H. I.: Real-time 3D model-based tracking using edge and keypoint features for robotic manipulation. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). S. 4048-4055, Anchorage, 2010.
- Crag04 Craggs, J.; Bloor, D.; Tanner, B.; Bullen, H.: Naval Compensated Gross Tonnage and Shipyard Learning. In: Journal of Ship Production. Volume 20, S. 107-113, 2004.
- Czum13 Czumanski, T.: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion. In [Hrsg.: Loedding, H. et. al.]: Wissen schafft Innovation. Band 19, Hamburg, 2013.

Literaturverzeichnis

- Derv06 Dervisopoulos, M.; Schatka, A.; Torney, M.; Warwela, M.: Life Cycle Costing im Maschinen- und Anlagenbau. In: Industrie Management, GITO-Verlag, 22/6, S. 55-58, Berlin, 2006.
- Diet13 Dietzel, A.: Vertriebscontrolling optimieren: Grundlagen und Praxis. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013.
- DIN31051 Norm DIN 31051:2012-09: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin, 2012.
- DIN4991 Norm DIN 4991:2006-04: Geschäftsvordrucke – Rahmenmuster für Handelspapiere. Berlin, 2006.
- DIN9000 Norm DIN EN ISO 9000:2005-09: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin, 2005.
- Dona08 Donath, D.: Bauaufnahme und Planung im Bestand. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008.
- Ehrl07 Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig entwickeln und konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer, 6. Auflage, Heidelberg, 2007.
- Eick14 Eickemeyer, S. C.: Kapazitätsplanung und -abstimmung für die Regeneration komplexer Investitionsgüter. In [Hrsg.: P. Nyhuis]: Berichte aus dem IFA, Band 04, Hannover, 2014.
- Enge81 Engelhardt, W. H.; Günter, B.: Investitionsgüter – Marketing. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1981.
- Essb14 Essbauer, S.: Sichtprüfung mit Gedächtnis: BMW Group testet Datenbrille zur Qualitätssicherung in der Produktion. BMW PressClub Deutschland, München, 2014.
- Faer06 Faerber, M.: Markerbasiertes Tracking für Augmented Reality Applikationen. Technical report, Ausgabe 3, ETH Zurich, 2006.
- Foeh90 Foehr, R.: Photogrammetrische Erfassung räumlicher Informationen aus Videobildern. In [Hrsg.: Ameling, W. et. al.]: Fortschritte der Robotik. Band 7, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1990.

- Frie13 Friedewald, A.; Titov, F.; Halata, P. S.; Lödding, H.: An Efficient Retrofit Planning Workflow. In [Hrsg.: RINA]: 16th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS 2013) Papers Volume I, S. 7-15, Busan, 2013.
- Frie15 Friedewald, A.; Loedding, H.; Titov, F.: Augmented Reality for the Retrofit of Ships. In [Hrsg.: V. Bertram]: 14th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '15). Proceedings, S. 236-246, Ulrichshusen, 2015.
- Gart14 Gartner Group: Gartner's hype cycle report. Technical report, Gartner Group, 2014.
- Geis09 Geissdörfer, K.: Total cost of ownership (TCO) und life cycle costing (LCC): Einsatz und Modelle: ein Vergleich zwischen Deutschland und USA. LIT Verlag, Münster, 2009.
- Girm06 Girmscheid, G.: Strategisches Bauunternehmensmanagement. Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. Springer Verlag, Heidelberg, 2006.
- Habe02 Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; von Massow, H.: Systems Engineering. In [Hrsg.: W. F. Daenzer, F. Huber]: Methodik und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 2002.
- Hala13 Halata, P. S.; Titov, F.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Systematische 3D-Ist-Daten-Aufnahme großer und komplexer Umgebungen. In [Hrsg.: Paul L. et. al.]: 3D-NordOst 2013 – 16. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten. Tagungsband, S. 135-145, Berlin, 2013.
- Hein15 Heinig, M.: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten. In [Hrsg.: Loedding, H. et. al.]: Wissen schafft Innovation. Band 23, Hamburg, 2015.
- HOAI2 §2 HOAI: Honorarordnung für Architekten- und Ingenieursleistungen. Erlensee, 2013.
- Hofm12 Hofmann, E.; Maucher, D.; Hornstein, J.; den Ouden, R.: Investitionsgütereinkauf. Erfolgreiches Beschaffungsmanagement komplexer Leistungen. Springer Verlag, Heidelberg, 2012.

- IMO05 International Maritime Organization: Marpol Annex VI: Regulations for the prevention of air pollution from ships. 2005.
- Izad11 Izadi, S., Kim, D., Hilliges, O., Molyneaux, D., Newcombe, R., Kohli, P., Shotton, J., Hodges, S., Freeman, D., Davison, 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 (UIST '11). Proceedings, S. 559-568, New York, 2011.
- Jaco08 Jacob, E.; Müller, R.: Das SCRi-Konzept zur Abgasnachbehandlung. Integrierte PM-Verminderung im SCR-System zur NOx-Reduktion. Motortechnische Zeitschrift, Volume 69, Issue 3, S. 220-226, 2008.
- Jahn04 Jahn, I.; Kersten, T.; Kinzel, R.: Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores. In [Hrsg.: T. Luhmann]: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage. Wichmann Verlag, S. 222-229, Heidelberg, 2004.
- Jian00 Jiang, B.; You, S.; Neumann, U.: Camera Tracking for Augmented Reality Media. In: Multimedia and Expo. 2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. S. 1637-1640. New York, 2000.
- Kaes04 Kaeser, M.; Reulke, R.: Laserscanner in der As-Built Dokumentation. 24 DGPF-Jahrestagung, Halle, 2004.
- Kers05 Kersten, T.; Sternberg, H.; Mechelke, K.; Lindstaedt, M.: Zur Objektgenerierung in Punktwolken des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 mit der Modellierungssoftware 3Dipsos. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS). Beiträge zum 65. DVW-Seminar. Band 48, Wißner-Verlag, S. 127-146, Fulda, 2005.
- Kers12 Kersten, T.; Lindstaedt, M.: Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS). Beiträge zum 69. DVW-Seminar. Band 69, Wißner-Verlag, S. 25-46, Augsburg, 2012.
- Kerz03 Kerzner, H.: Projekt Management. Ein systemorientierter Ansatz zur Planung und Steuerung. 8. Ausgabe, mitp-Verlag, Bonn, 2003.

- Kipp12 Kipper, G.; Rampolla, J.: *Augmented Reality: An Emerging Technologies Guide to AR*. Elsevier, 2012.
- Klei98 Kleinaltenkamp, M.: *Angebotsbearbeitung – Schnittstelle zwischen Kunden und Liferanten*. In [Hrsg: VDI]: *Praxis des technischen Vertriebs*. Springer, Berlin, 1998.
- Klep11 Kleppmann, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. In [Hrsg.: Brunner F. J.]: *Praxisreihe Qualitätswissen*. 7 Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- Kloc03 Klocke F.; Straube, A. M.; Pypec, C.: *Vorsprung durch Virtual Reality. Studie über den industriellen Einsatz von Virtual Reality*. Aachen, 2003.
- Knab08 Knabl, T.; Gottwald, R.: *CCEM-Retrofit – 3D-Messtechnik bei der energieeffizienten Sanierung von Altbauten*. In: *Géomatique Suisse*. Volume 11, 2008.
- Koch04 Koch, J. B.: *Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen*. In [Hrsg.: Nedeß, C. et. al.]: *Wissen schafft Innovation*. Hamburg, 2004.
- Krau04 Kraus, K.: *Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanaufnahmen*. Ausgabe 7, Walter de Gruyter, Berlin, 2004.
- Kroe07 Kroell, M.: *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung*. In: *IPA-IAO Forschung und Praxis*. Nr. 468, Stuttgart, 2007.
- Kust11 Kuster, J.; Huber, E.; Lippmann, R.; Schmid, A.; Schneider, E.; Witschi, U.; Wuest, R.: *Handbuch Projektmanagement*. 3 Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2011.
- Liu12 Liu, J.; Au, O. K.-C.; Fu, H.; Tai, C.-L.: *Two-Finger Gestures for 6DOF Manipulation of 3D Objects*. In: *Computer Graphics Forum*. Volume 31, Issue 7, S. 2047-2055, 2012.
- Loed08 Loedding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Springer, 2. Auflage, Berlin, 2008.

- Lore08 Lorenz, S.; Kaiser, R.; Assmann, E.; Engstler, F.; Zoellner, R.: Ergonomieabsicherung im Fahrzeug mittels Mixed Reality: Beeinflussung der Sitzposition durch die Vorgehensweise bei der Sitzeinstellung. München, 2008.
- Loed12 Lödding, H.; Friedewald, A.; Titov, F.: Ergonomie-Absicherung in Virtual Reality mit dem ViP-Toolset. In [Hrsg.: Lukas, U. v. et al.]: Go-3D 2012 – Computergraphik für die Praxis. Tagungsband, S. 83-93, Rostock, 2012.
- Luhm01 Luhmann, T.: Photogrammetrische Verfahren in der industriellen Messtechnik. In: Publikationen der DGPF. Band 9, 2001.
- Luka09 Lukas, U.; Vahl, M.; Deistung, E.; Mesing, B.: Augmented Reality für die maritime Industrie, Dokumentation der Ergebnisse der Studie USE-AR. Rostock, 2009.
- Mehl14 Mehler-Bicher, A.; Steiger, L.: Augmented Reality. Theorie und Praxis. 2. Auflage, De Gruyter Verlag, Oldenburg, 2014.
- Meie12 Meier-Peter, H.; Bernhardt, F.: Handbuch Schiffsbetriebstechnik. Betrieb – Überwachung – Instandhaltung. 2. Auflage, Seehafen-Verlag, Hamburg, 2012.
- Milg94 Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Telem manipulator and Telepresence Technologies. Vol. 2351, S. 282-292, Kyoto, 1994.
- Mueh09 Muehlstedt, J.; Kaußler, H.; Spanner-Ullmer, B.: Programme in Menschengestalt: digitale Menschmodelle für CAx- und PLM-Systeme. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. Ergonomie Verlag, 2009.
- Mumm95 Mummendey, H. D.: Die Fragebogen-Methode. 2. Auflage, Hogrefe Verlag, Göttingen, 1995.
- Nede08 Nedeß, C.; Friedewald, A.; Schaefer, C.: Veränderung von Engineering-Prozessen durch Virtual Reality – dargestellt am Beispiel des deutschen Schiffbaus. In [Hrsg.: B. Scholz-Reiter]: Wandlungsfähige Produktionssysteme. GITO Verlag, S. 137-153, Berlin, 2008.

- Nede09 Nedeß, C.; Friedewald, A.; Schaefer, C., Schleusener, S.; Neumann, L.: USE-VR Abschlussbericht. Hamburg, 2009.
- Paff13 Paffenholz, J.-A.: Effiziente Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken und deren Nutzung für Monitoringaufgaben. In [Hrsg.: U Rüppel]: 2. Darmstädter Ingenieurskongress. Bau und Umwelt. Shaker, S. 581-588, Darmstadt, 2013.
- Pett05 Pettee, S. R.: As-builts – Problems & Proposed Solutions. In: CM eJournal. 2005.
- PMI13 Project Management Institute: A guide to the project management body of knowledge. 5. Auflage, Pennsylvania, 2013.
- Rein11 Reinders, H.: Fragebogen. In [Hrsg.: Reinders, H. et. al.]: Empirische Bildungsforschung. Strukturen und Methoden. Springer, Wiesbaden, 2011.
- Roen14 Roennaeng, M.: The Myth of the As-builts. In: SPAR International. Colorado Springs, 2014.
- Roos09 Roos, H. J.: Über Bau und Umbau des größten Werftportalkrans der Welt – Schweißtechnische Abenteuer beid er Weiterverwendung eines technologieintensiven Investitionsguts. In: Stahlbau. Volume 78, Issue 12, S. 952-955, Berlin, 2009.
- Rott98 Rottensteiner, F.: Hochgenaue Lokalisierung von Signalen und automatische Rekonstruktion von Objektoberflächen mit digitalen Bildern. In: VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 86(1), S. 23-30, 1998.
- Rund07 Runde, C.: Konzeption und Einführung von Virtueller Realität als Komponente der Digitalen Fabrik in Industrieunternehmen. In: IPA-IAO Forschung und Praxis. Jost-Jetter-Verlag, Nr. 455, Heimsheim, 2007.
- Scha12 Schaefer, C.: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion. In [Hrsg.: Loedding, H. et. al.]: Wissen schafft Innovation. Band 16, Hamburg, 2012.

Literaturverzeichnis

- Scha04 Schaefer, T.; Weber, T.: Laserscanning – Von der Punktwolke zum CAD. In: 14th International Conference on Engineering Surveying. Zürich, 2004.
- Schm08 Schmidt, H.: VDI-Studie zum Angebotsmanagement. Ergebnisse einer Umfrage bei ca. 300 Industrieunternehmen im B2B-Geschäft. Düsseldorf, 2008.
- Schu11 Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS. 4. Auflage, Springer Vieweg, Aachen, 2011.
- Ship12 Ship & Offshore: Case study compares LNG with scrubber retrofit. Ship & Offshore, 6, S.10-14, 2012.
- Suck96 Suckrow, C.: Internationale Geschäftsfeld-Positionierung in Investitionsgütermärkten. Dt. Univ.-Verlag, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1996.
- Steg03 Steglich, M.: Kosten- und Risikostrukturen wichtiger Vertragsformen in der Maintenance ziviler Flugtriebwerke. In [Hrsg.: L. Ungvari]: Wissenschaftliche Beiträge, S. 95- 105, Wildau, 2003.
- Steil4 Stein, M.: Einsatz der Augmented-Reality-Technologie zur Unterstützung des Fahrers von Flurförderzeugen. München, 2014.
- Ster07 Sternberg, H.; Kersten, T.: Comparison of terrestrial laser scanning systems in industrial as-built-documentation applications. In [Hrsg.: Gruen und Kahmen]: Optical 3-D Measurement Techniques VIII. Volume 1, S. 389-397, Zürich, 2007.
- Swan02 Swan, A.; Carter, P. L.; Monczka, R. M.; Carter, C. R.: Coming into Focus: Using the lens of Economic Value to Clarify the Impact of B2B E-Marketplaces. In [Hrsg.: Hahn, D.]: Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement. 2 Auflage, Wiesbaden, 2002.
- Tegt06 Tegtmeier, A.: Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie. Dissertation, Magdeburg, 2006.
- Tesi08 Tesium: Umbau von Chemieanlagen und Anlagen der Prozessindustrie? Retrofit oder Arbeiten an Brownfield Anlagen. Url:

- <http://www.tesium.de/de/unternehmen/meldung/umbau-von-chemieanlagen-und-anlagen-der-prozessindustrie-retrofit-oder-arbeiten-an-brownfield-anlag.html>.
- Tito13a Titov, F.; Friedewald, A.: Handling Human Models in Virtual Reality Applications with MS Kinect. In: [Hrsg.: Bertram, V.]: 12th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '13). Proceedings, S. 274-282, Cortona, 2013.
- Tito13b Titov, F.; Friedewald, A.: Konzepte zur intuitiven Bewegungssteuerung virtueller Menschmodelle. In [Hrsg.: Forschungsschwerpunkt Maritime Systeme]: 4. Interdisziplinärer Workshop Maritime Systeme. Tagungsband, Hamburg, 2013.
- Tito14 Titov, F.; Friedewald, A.; Loedding, H.: Augmented Reality zur kundenintegrierten Variantenplanung. In [Hrsg: Kersten et. al.]: Industrie 4.0 – Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Hochschulgruppe Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). GITO-Verlag, S. 297-316, Berlin, 2014.
- Tito15 Titov, F.; Friedewald, A.; Loedding, H.: Improving the tender quality for retrofit projects. In: 15th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR15). Proceedings, Banff, 2015.
- Toll02 Tolles, E. L.; Kimbro, E. E.; Ginell, W. S.: Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Retrofitting of Historic Adobe Structures. In: GCI Scientific Program Reports. Los Angeles, 2002.
- vanK10 van Krevelen, D. W. F.; Poelman, R.: A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. In: The International Journal of Virtual Reality. Vol. 9, S. 1-20, 2010.
- VDI2884 Richtlinie VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Düsseldorf, 2005.
- VDI4504a Richtlinie VDI 4504: Angebotsmanagement im Industriegütergeschäft. Blatt 1, Düsseldorf, 2010.
- VDI4504b Richtlinie VDI 4504: Angebotsdokumente im Vertrieb komplexer technischer Produkte. Blatt 2, Düsseldorf, 2010.

- VDMA06 Richtlinie VDMA 34160: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Berlin, 2006.
- Vinc12 Vincze, M.; Wohlkinger, W.; Aldoma, A.; Olufs, S.; Einramhof, P.; Zhou, K.; Potapova, E.; Fischinger, D.; Zillich, M.: Situiertes Sehen für bessere Erkennung von Objekten und Objektklassen. In: Elektrotechnik & Informationstechnik. Springer, Heft 1, S. 42-52, 2012.
- Voll03 Vollrath, C.; Nase, A.: Spitzeleistung im Einkauf, Der Einkaufs-Performance-Index 2002. Frankfurt, 2003.
- Waer13 Waertsilae: Retrofit Solutions.
<http://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/exhaust-gas-cleaning/brochure-o-env-exhaust-gas-cleaning-systems%20.pdf>, zuletzt geöffnet am 05.11.2015.
- Walt12 Walter, J.; Wagner, J.: Choosing Exhaust Scrubber Systems. Maritimes Cluster Northern Germany, 2012.
- Whel12 Whelan, T.; McDonald, J.; Kaess, M.; Fallon, M.; Johansson, H.; Leonard, J. J.: Kintinuuous: Spatially extended KinectFusion. In: RSS Workshop on RGB-D: Advanced Reasoning with Depth Cameras, Cambridge, 2012.
- Wien02 Wiendahl, H.-P.; Fiebig, C.; Harms, T.: Kostenintensiver Einsatz von Virtual Reality im Rahmen der Digitalen Fabrik. In [Hrsg.: J. Gausemeier]: Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. 1. Paderborner Workshop, S. 39-51, Paderborn, 2002.
- Wilk02 Wilke, W.: Segmentierung und Approximation großer Punktwolken. Darmstadt, 2002.
- Will06 Willers, D.: Augmented Reality at Airbus. International Symposium on Mixed & Augmented Reality, Santa Barbara, 2006.
- Wund04 Wunderlich, T.; Ingensand, H.: Von der Punktwolke zum CAD. In: 14th International Conference on Engineering. Zürich, 2004.
- Zhou08 Zhou, F.; Duh, H.; Billinghurst, M.: Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. S. 193-202, Cambridge, 2008.

Anhang

Teil A

Basisbereich des Fragebogens zur Aufnahme projektbezogener Daten.

Auftragsinformationen			
Basisbereich			
Angaben zum Schiff			
Schiffsname:			
Schiffstyp:			
IMO Nummer:			
Flagge des Landes:			
Klassifikationsgesellschaft:			
Schiffseinsatzgebiet / Route:			
Motorkennung der Haupt- und Hilfsmotoren			
Angaben zum Interessenten			
Auftraggeber:	<input type="checkbox"/> Charterer	<input type="checkbox"/> Reeder	
Name:			
Anschrift:			
Kontaktperson:			
Telefon:			
E-Mail:			
Auftragsgegenstand			
<input type="checkbox"/> Motortausch		<input type="checkbox"/> Trocken-Scrubber Nachrüstung	
<input type="checkbox"/> Partikelfilter Nachrüstung		<input type="checkbox"/> SCR Nachrüstung	
Geplanter Zeitraum für die Maßnahme:			
Kommentar:			
Bitte beifügen, falls vorhanden:			
- bemaßte/unbemaßte Schnittzeichnungen für den Maschinenraum oder den Abgastrakt			
- 3D-Schiffsplanungsmodell			
- As-Build 3D-Modelle für den Maschinenraum und den Abgastrakt			
Bitte senden Sie den ausgefüllten Fragebogen an:			
	per Post an:		
<i>oder</i>	per E-Mail an:		
<i>oder</i>	per Fax an:		

Teil B

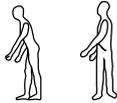
Benötigte Anzahl an Laserscan- und 3D-Kameraaufnahmen in Abhängigkeit von der geforderten Vollständigkeit, der Dichte und der durchschnittlichen Größe der Bauteile. Die Anzahl der benötigten Vermessungen für 3D-Kameras stellt einen Richtwert bei einer durchschnittlichen Vermessungsdauer von sechs Minuten dar.

Vollständigkeit	Dichte	Größe	Laser	3D-Kamera	
1	1	1	33*	36*	
		2	23	22	
		3	13	19	
	2	2	1	21*	31*
			2	15	28
			3	10	18
	3	3	1	10	23
			2	9	19
			3	8	18
2	1	1	23*	25*	
		2	15	16	
		3	8	12	
	2	2	1	14*	20*
			2	10	13
			3	6	8
	3	3	1	6	9
			2	6	8
			3	6	8
3	1	1	14*	16*	
		2	9	11	
		3	5	7	
	2	2	1	10*	12*
			2	7	7
			3	4	5
	3	3	1	5	6
			2	4	5
			3	3	5

* abgeschätzt

Teil C

Grafische Darstellung der Haltungsbewertung der angepassten PATH-Methode.

Körperteil	Position		Vorgeschlagenes Ergebnis
Rumpf	neutral		1
	nicht neutral		2
	schwer		3
Beine	neutral		1
	nicht neutral		2
	keine Stütze		3
Arme	neutral		1
	gestreckt		3

12965

Lebenslauf

Name	Titov
Vorname	Fedor
Geburtsdatum	20.05.1986
Geburtsort, -land	Zhukowskij, Russland
08.1992 - 02.1993	Grundschule Nr.8 in Zhukowskij, Russland
03.1993 - 07.1995	Grundschule Quellmoor in Hamburg
08.1995 - 07.2001	Gesamtschule Süderelbe in Hamburg
08.2001 - 07.2004	Gymnasiale Oberstufe der Gesamtschule Harburg in Hamburg
10.2004 - 03.2008	Studium an der Technischen Universität Hamburg Abschluss: Bachelor
04.2008 - 07.2010	Studium an der Technischen Universität Hamburg Abschluss: Diplom
11.2010 - 12.2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg
01.2016 - 06.2016	Weltreise

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 Umrisssbearbeitung 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 Umrisssfräsen 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.