



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## DISSERTATION

# Entwicklung eines Vorgehensmodells zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaften (Dr. techn.)

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften von

**Dipl.-Ing. Gerhard Reisinger**

Matrikelnummer: 1125803

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dipl. Wirt.-Ing. Wilfried Sihn  
Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften

Wien, im Dezember 2022

begutachtet von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Peter Kuhlant

Technische Universität Wien

Institut für Managementwissenschaften

Prof. Dr.-Ing.

Bernd Kuhlentötter

Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Produktionssysteme

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## DISSERTATION

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Dissertation nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Dissertationsthema bisher weder im Inland noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, am 01. Dezember 2022

---

(Gerhard Reisinger)

## Kurzfassung

Der Wandel von der Massen- zur kundenorientierten Produktion impliziert unter anderem eine steigende Anzahl von Varianten und kleinere Losgrößen. Eine hohe Komplexität von Montageprozessen in Kombination mit der Forderung, kleinste Losgrößen wettbewerbsfähig zu produzieren, schließt eine vollständige Automatisierung von Montageabläufen aus. Damit manuell geprägte Montageschritte von Mitarbeitenden sowohl effizient als auch mit einer hohen Qualität ausgeführt werden, sind diese in standardisierten Arbeitsanweisungen dokumentiert.

Während papierbasierte Arbeitsanweisungen in der Montage auf Grund Ihrer gedruckten Form nicht mehr die geforderte Flexibilität sowie Aktualität aufweisen, werden Mitarbeitende durch visuelle Werkerführungssysteme bei der Durchführung der Montageaufgaben unterstützt. Die ausgegebenen Informationen liegen in Form von Texten, Bildern, Videos, virtuellen 3D-Objekten oder binären Lichtsignalen vor und werden noch vor der Durchführung des Montageprozesses erstellt und in die Speichermedien der einzelnen Werkerführungssysteme übertragen. Dieser Vorbereitungsprozess ist zeitaufwendig und erfordert ein ausgeprägtes Spezialwissen in Programmierung und CAD-Modellierung. Im wissenschaftlichen Kontext wird von einer Vielzahl von Experten auf diesen Sachverhalt hingewiesen. Einzelne Methoden zur Lösung des Problems werden in aktuellen Entwicklungen und Veröffentlichungen aufgezeigt, es fehlt jedoch ein durchgängiger Ansatz mit hohem Automatisierungsgrad.

In vorliegender Dissertationsschrift wird ein ganzheitliches Vorgehensmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme entwickelt, als softwarebasierter Prototyp implementiert und hinsichtlich Auswirkungen auf Effektivität sowie Effizienz des Arbeitsvorbereitungsprozesses untersucht. Darüber hinaus werden systematisch Effekte von einzelnen Automatisierungsmöglichkeiten hinsichtlich der erwirkten Zeiteinsparung im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme quantifiziert.

Durch die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells und Automatisierung von Teilprozessen wurde in untersuchten Anwendungsfällen eine signifikante Reduktion von erforderlichen benötigten Arbeitsvorbereitungsaufwände um bis zu 90% gemessen, wodurch visuelle Werkerführungssysteme auch bei kleinsten Losgrößen und hochvarianten Produkten wirtschaftlich einsetzbar werden.

Schlagworte zur Arbeit: Digitale Assistenzsysteme, Visuelle Werkerführungssysteme, automatisierte Informationsversorgung, Mensch-Software-Kollaboration

## Abstract

Digitization and demographic change present enormous challenges for production companies. The trend from mass- to customer-oriented production implies an increasing number of variants and smaller lot sizes. The high complexity of assembly processes in combination with the requirement to be able to competitively produce smallest lot sizes precludes complete mechanic automation of assembly. Increased complexity of assembly processes leads to increasing cognitive load on human assembly operators and thus favors the occurrence of quality defects and an increase of the required assembly time. To ensure that these manual work processes can be carried out by employees both efficiently and with a high level of quality, they are documented in standardized work instructions.

While paper-based work instructions no longer have the required flexibility, employees can be assisted by visual worker guidance systems to perform the assembly tasks with the desired quality. The output information of these systems may be in the form of texts, images, videos, 3D virtual objects or simple light signals and must be prepared and created in advance of production and transferred to the databases of the individual worker guidance systems. This preparation process is very time consuming and usually requires a lot of specialized knowledge in programming and CAD modelling. In scientific context, this problem is pointed out by various experts. Individual methods to mitigate the problem are highlighted in recent developments and publications, but no holistic and consistent approach has been presented so far.

In course of this dissertation, a process model for an automated provision of information for visual worker guidance systems will be developed, implemented as a software-based prototype and evaluated with regard to the impact on effectiveness and efficiency of the work preparation process. In addition, the effects of the automation possibilities in the information supply process of visual worker guidance systems shall be systematically quantified.

Due to the planned automation of sub-processes, in studied use cases a significant reduction of up to 90% of the required work preparation effort is possible, whereby these visual worker guidance systems can be used economically even at smallest batch sizes and highly variant products.

**Keywords:** Digital Assistance Systems, Visual Worker Guidance Systems, Partially Automated Information Supply, Human-Software Collaboration

## Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Anstellung bei der Fraunhofer Austria Research GmbH sowie an der Technischen Universität Wien. Allen Kolleginnen und Kollegen, welche mich in dieser Zeit begleitet und unterstützt haben, danke ich für die gemeinsame Zusammenarbeit in vielen spannenden Projekten, einen stets konstruktiven Austausch und für eine Vielzahl hilfreicher Tipps und Antworten auf brennende Fragen. Insbesondere möchte ich meinem langjährigen Kollegen Philipp Hold danken, welcher nicht nur die Begeisterung am wissenschaftlichen Arbeiten in mir geweckt hat, sondern auch abseits meiner Dissertation in vielen Belangen ein Vorbild für meine Tätigkeit und persönliche Entwicklung war. Weiters danke ich meinem langjährigen Vorgesetzten Thomas Edtmayr dafür, dass ich wegen seines innovativen Weitblicks meinen Weg in die Fraunhofer Familie gefunden habe und Dank seines motivierenden Führungsstils meine zuvor gesammelten Erfahrungen als selbständiger Unternehmer optimal ausleben und weiter schärfen durfte.

Besonders danke ich Prof. Wilfried Sihn für die Betreuung meiner Dissertation, für das Stellen der richtigen Fragen und für seine Fähigkeit, Wesentliches von Unwesentlichem zu unterscheiden. Neben seinen fachlichen und wissenschaftlichen Qualitäten als Professor an der Technischen Universität Wien schätze ich vor allem seine ausgeprägte unternehmerische Herangehensweise an praktische Probleme und daraus abgeleiteten Lösungen.

Den erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation verdanke ich meiner Lebensgefährtin Jasmin, meinen Eltern Marina und Gerhard, meiner Familie, sowie allen Freunden. Dabei bin ich insbesondere dankbar für Unterstützung jedweder Art, ein stets mitgebrachtes Verständnis, wenn für private Tätigkeiten einmal nicht so viel Zeit verfügbar war und für ihre offenen Ohren, wenn es in manchen Phasen der Dissertation mehr Fragen als Antworten oder mehr Herausforderungen als Lösungen gab.

Allem voran widme ich diese Dissertation meinem verstorbenen Großvater Josef Reisinger, welcher bis zuletzt seine Begeisterung für die Technik nicht verloren hat und ungeachtet seines hohen Alters stets neue Herausforderungen mit einem Lächeln angenommen hat und mich damit wesentlich prägte.

Wien, im Dezember 2022

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>8</b>
1.1	AUSGANGSSITUATION .....	8
1.2	PROBLEMSTELLUNG .....	10
1.3	AUFBAU DER ARBEIT .....	12
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN UND EINGRENZUNG DER ARBEIT .....</b>	<b>15</b>
2.1	MONTAGESYSTEME .....	15
2.1.1	Grundlagen und Aufbau von Montagesystemen.....	15
2.1.2	Cyberphysische Montagesysteme im Umfeld einer intelligenten Fabrik ..	18
2.1.3	Prozessmodellierung und Planung von Montagesystemen .....	23
2.1.4	Zusammenfassung und Fazit.....	25
2.2	VISUELLE WERKERFÜHRUNGSSYSTEME .....	26
2.2.1	Industrielle Assistenzsysteme in der Produktion.....	26
2.2.2	Informatorische Assistenzsysteme .....	28
2.2.3	Werkerinformationen in visuellen Werkerführungssystemen .....	30
2.2.4	Zusammenfassung und Fazit.....	34
2.3	INFORMATIONSVERSORGUNG VISUELLER WERKERFÜHRUNGSSYSTEME.....	34
2.3.1	Methoden und Werkzeuge der manuellen Informationsversorgung.....	35
2.3.2	Automatisierte Ansätze und Verfahren der Informationsversorgung.....	39
2.3.3	Produktbeschreibende Daten im Informationsversorgungsprozess.....	49
2.3.4	Zusammenfassung und Fazit.....	51
2.4	EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSBEREICHS .....	53
<b>3</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG UND FORSCHUNGSBEDARF .....</b>	<b>58</b>
3.1	STAND DER FORSCHUNG .....	58
3.2	EINORDNUNG DES STANDS DER FORSCHUNG UND FORSCHUNGSBEDARF.....	65
3.3	ZIELSETZUNG UND FORSCHUNGSFRAGE.....	73
3.4	KRITISCHE REFLEXION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	74
<b>4</b>	<b>IST-ANALYSE UND ANFORDERUNGSABLEITUNG .....</b>	<b>77</b>
4.1	IST-ANALYSE DES AKTUELLEN INFORMATIONSVERSORGUNGSPROZESSES .....	77
4.2	ABLEITUNG DER ANFORDERUNGEN .....	87
4.3	KRITISCHE REFLEXION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	91
<b>5</b>	<b>ENTWICKLUNG DES VORGEHENSMODELLS.....</b>	<b>93</b>

5.1	KONZEPTION DES VORGEHENSMODELLS .....	93
5.2	IDENTIFIZIERUNG VON AUTOMATISIERUNGSPOTENZIALEN IM ANALYSIERTEN INFORMATIONSVERSORGUNGSPROZESS.....	98
5.3	FORMULIERUNG DES PROZESSMODELLS .....	101
5.4	FORMULIERUNG DES INFORMATIONSMODELLS.....	109
5.5	KRITISCHE REFLEXION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	113
<b>6</b>	<b>VALIDIERUNG DURCH ANWENDUNG DES VORGEHENSMODELLS .....</b>	<b>115</b>
6.1	PROTOTYPISCHE IMPLEMENTIERUNG DES VORGEHENSMODELLS .....	115
6.1.1	Plattform des Software-Artefakts .....	117
6.1.2	Graphische Benutzeroberfläche des Software-Artefakts .....	118
6.1.3	Integration des Software-Artefakts in die Systemumgebung .....	122
6.2	VALIDIERUNG DES VORGEHENSMODELLS DURCH EIN FALLBEISPIEL.....	123
6.2.1	Beschreibung des Fallbeispiels .....	123
6.2.2	Ablauf des Fallbeispiels & Anwendung des Vorgehensmodells .....	125
6.2.3	Darstellung der Ergebnisse .....	126
6.3	KRITISCHE REFLEXION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	135
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK DER ARBEIT .....</b>	<b>142</b>
7.1	ZUSAMMENFASSUNG .....	142
7.2	DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....	143
7.3	AUSBLICK .....	145
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>147</b>
<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>167</b>
<b>10</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>169</b>
<b>11</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>170</b>
<b>12</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>174</b>
12.1	LEBENS LAUF DES AUTORS .....	174
12.2	PUBLIKATIONS LISTE.....	176

**Anmerkung zum Sprachgebrauch:**

Im Weiteren erfolgen die allgemeinen Bezeichnungen von Personen aus Gründen der Lesbarkeit und Übersichtlichkeit in konventioneller Sprachform. Mit allen verwendeten Personenbezeichnungen sind stets beide Geschlechter gemeint, außer es wird ausdrücklich auf weibliche oder männliche Personen hingewiesen beziehungsweise geht entsprechendes aus dem Kontext hervor.

# 1 Einleitung

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen des Forschungsprojekts „TAI-VW: Entwicklung eines Prozessmodells zur teilautomatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme“ entstanden und wurde durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Programm „4. Ausschreibung Forschungspartnerschaften – Industrienähe Dissertationen“ mit der Projektnummer 870667 gefördert. Im Zuge des Projektvorhabens wurde ein Vorgehensmodell, bestehend aus einem Prozessmodell und einem Informationsmodell zur teilautomatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme entwickelt, als softwarebasierter Prototyp implementiert und hinsichtlich der Auswirkungen auf Effektivität sowie Effizienz des Arbeitsvorbereitungsprozesses validiert. Im Folgenden werden Ausgangssituation, Problemstellung sowie Aufbau der Arbeit beschrieben.

## 1.1 Ausgangssituation

Eine zunehmende Erhöhung der Produktvielfalt bei gleichzeitigem Bestreben geringer Produktionskosten ist ein Leitziel der individuellen Massenproduktion (vgl. Koren 2010). Dieser Trend impliziert eine steigende Anzahl von Varianten, kürzere Produktlebenszyklen, eine höhere Produktkomplexität sowie kleinere Produktionslose bis zu Losgröße 1 (vgl. Dombrowski et al. 2013a) (vgl. Rusch et al. 2021). Losgröße 1 bedeutet, dass jedes produzierte Stück ein Unikat ist, mit individuellen Montagereihenfolgen, zu verwendenden Baugruppen und technischen Besonderheiten. Der Produktionsprozess ist dabei gekennzeichnet durch eine hohe erforderliche Anpassungsfähigkeit, große Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung, komplizierte globale Lieferketten sowie das Erfordernis anpassungsfähiger Produktionssysteme (vgl. Dean et al. 2009) (vgl. Monostori und Váncza 2020).

Neben Individualisierung und Globalisierung ist die Digitalisierung der Produktion ein Megatrend, welcher neue Herausforderungen aufwirft, jedoch auch neue Lösungswege zur Beherrschung der erhöhten Anforderungen bietet (vgl. Siedelhofer et al. 2017). Die Digitalisierung der Produktion wird im allgemeinen Sprachgebrauch mit dem Begriff Industrie 4.0 beziehungsweise der vierten industriellen Revolution verknüpft. Dieser wurde 2011 in den Aktionsplan der Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung aufgenommen (vgl. Kagermann et al. 2013) und beschreibt das gleichnamige Projektvorhaben, welches die deutsche Industrie vorbereitet, um die

digitale Zukunft der Produktion Wirklichkeit werden zu lassen (vgl. Meißner et al. 2017). Industrie 5.0 ergänzt das Industrie 4.0 Paradigma durch die zentralen Ziele der Nachhaltigkeit und Resilienz, soll den Menschen mehr in den Mittelpunkt rücken und geht damit über eine reine Steigerung von Effizienz und Produktivität hinaus (vgl. European Commission 2021). Laut SEE und KERSTEN wird Digitalisierung mit Automatisierung und der Substitution von Mitarbeitenden verbunden, wobei Studien, welche sich mit Substitution menschlicher Arbeitskräfte befassen, zu unterschiedlichen Erkenntnissen gekommen sind (vgl. See und Kersten 2017): Es ist zu erwarten, dass in industriellen Produktionsprozessen zukünftig der Automatisierungsgrad zunimmt, jedoch gleichzeitig die Komplexität der Produktionsprozesse steigt. Eine menschenleere Fabrik, wie sie von Ingenieuren bereits in den Siebzigerjahren im Rahmen des Computer Integrated Manufacturing (CIM) vorgeschlagen wurde, ist bei Industrie 4.0 nicht zu erwarten. Dies wird damit untermauert, dass Menschen eine Vielzahl an Kompetenzen und Eigenschaften besitzen, welche nicht oder nur mit hohem Aufwand von Maschinen oder Algorithmen zu übernehmen sind, wie beispielsweise Reagieren auf unvorhergesehene Ereignisse sowie Aneignung und Kommunikation von Erfahrungswissen (vgl. Haase et al. 2015).

Dies gilt insbesondere im Bereich der Montage, welche sich durch eine hohe Komplexität, kleine Losgrößen und bei einem Anteil von 30 bis 50 % der Lohnkosten als besonders personalintensiv auszeichnet (vgl. Pintzos et al. 2015). Hohe Komplexität von Montageprozessen in Kombination mit Forderungen, kleinste Losgrößen wettbewerbsfähig zu produzieren, schließt eine vollständige mechanische Automatisierung der Montage aus (vgl. Müller et al. 2015). Der Mensch bleibt in diesem turbulenten Umfeld auch in naher Zukunft im Mittelpunkt des Montagesystems (vgl. Malik und Bilberg 2019).

Um eine stetig steigende Anzahl an Produktvarianten fehlerfrei und in der aus betriebswirtschaftlicher Sicht erforderlichen Vorgabezeit zu montieren, entsteht für Montagemitarbeitende ein erhöhter Informationsbedarf bezüglich Werkstück, auszuführenden Arbeitsvorgängen sowie der korrekten Arbeitsmethode. Papiergebundene Arbeitsunterlagen, wie beispielsweise ausgedruckte Arbeitspläne oder Montageanleitungen, decken diesen Informationsbedarf, werden jedoch in der betrieblichen Praxis von Mitarbeitenden kaum beachtet und von Mitarbeitenden der Arbeitsvorbereitung nur in seltenen Fällen aktuell gehalten (vgl. Hinrichsen et al. 2018) (vgl. Hold et al. 2015). Zusätzlich kommt es bei einer papierbasierten Bereitstellung von Informationen zu unnötigen Suchzeiten, falschen oder irreführenden Inhalten sowie Querverweisen zwischen verschiedenen Papierdokumenten (vgl. Lušić et al. 2014). Ein elektronisches Werkerinformationssystem stellt benötigte Informationen

effizient sowie zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung und bietet damit eine Möglichkeit, diese Probleme zu mindern beziehungsweise zu eliminieren (vgl. Fischer et al. 2015). Zusätzlich wird bei Verwendung von elektronischen Werkerinformationssystemen von einer Steigerung der Produktivität, mehr Autonomie und Freiheit bei der Gestaltung des Arbeitsalltags sowie positiven Einflüssen auf die Arbeitszufriedenheit berichtet (vgl. Hannola et al. 2018). Eine bedeutende Untergruppe von elektronischen Werkerinformationssystemen sind visuelle Werkerführungssysteme. Diese ermöglichen es, Mitarbeitende schrittweise im Arbeitsprozess anzuleiten und erforderliche Informationen durch ein Ausgabegerät, wie zum Beispiel einem Bildschirm, zur Verfügung zu stellen (vgl. Wiesbeck 2013).

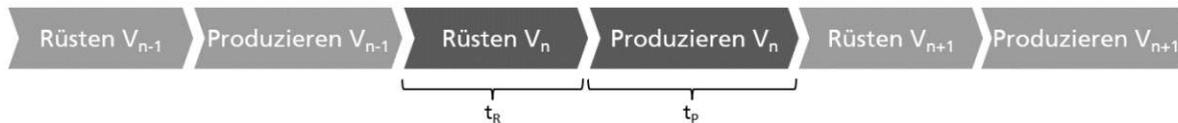
## 1.2 Problemstellung

Visuelle Werkerführungssysteme sind als Softwarepakete erhältlich und finden in industriellen Produktionsprozessen an verschiedensten Stellen und mit unterschiedlichen Zielsetzungen Anwendung (vgl. Teubner et al. 2019). Der Anbietermarkt ist breit aufgestellt; im deutschsprachigen Raum sind eine Vielzahl kommerziell erhältlicher visueller Werkerführungssysteme wie Armbruster ELAM, Sarissa Quality Assist, Ulixes DerAssistent oder Siemens EWI zu identifizieren. Dazu kommt eine Vielzahl an Eigenentwicklungen, Prototypen und Mockups, beispielsweise von Universitäten oder außeruniversitären Forschungseinrichtungen (vgl. Bertram et al. 2018). Dargestellte Werkerinformationen liegen in Form von Texten, Bildern, Videos, virtuellen 3D-Objekten oder einfachen Lichtsignalen vor und werden im Vorfeld der Produktion erstellt, programmiert und in die jeweiligen Datenbanken, respektive Speichermedien, der einzelnen Werkerführungssysteme übertragen (vgl. Hold P., Ranz F., Sihn W. 2016) (vgl. Fellmann et al. 2017). Zur Erstellung dieser Informationen ist ein umfangreiches Spezialwissen in Programmierung und CAD-Modellierung erforderlich, wodurch ausschließlich speziell geschulte Mitarbeitende in der Lage sind, diese Tätigkeit durchzuführen. Darüber hinaus ist dieser Erstellungsprozess zeitaufwendig und nimmt in vielen Fällen eine hohe Anzahl an Mitarbeiterstunden in Anspruch (vgl. Wolfartsberger et al. 2017) (vgl. Zogopoulos et al. 2022). Im Falle einer Kleinst- oder Einzellosproduktion, wird dieser Vorbereitungsprozess für jede einzelne Produktvariante erneut durchgeführt.

- Alt: Serienproduktion → Große Losgrößen



- Neu: Einzelproduktion → Kleinste Losgrößen bis zu „Losgröße 1“



- $t_R$  ... Rüstzeit (Stützleistung)
- $t_P$  ... Produktionszeit (Nutzleistung)
- $t_{ges} = t_R + t_P$
- $t_{ges}$  ... Gesamtzeit für Variante
- $p_R = t_R / t_{ges}$  (Rüstzeitanteil)
- $p_P = t_P / t_{ges}$  (Produktionszeitanteil)

**Abbildung 1: Veränderung der Anteile von Produktionszeit (Nutzleistung) und Rüstzeit (Stützleistung)**

Abbildung 1 verdeutlicht eine Veränderung der Anteile von Produktionszeit (Nutzleistung, direkt wertschöpfend) und erforderlicher Vorbereitungs- beziehungsweise Rüstzeit (Stützleistung, nicht direkt wertschöpfend). Im Falle kleiner Losgrößen hat dies zur Folge, dass der prozentuelle Anteil der Produktionszeit und damit der wertschöpfenden Nutzleistung, signifikant sinkt und Kosten für eine Verwendung des Werkerführungssystem anteilmäßig stark steigen. In der Literatur wird von verschiedenen Autoren auf diese Problemstellung hingewiesen (vgl. Aehnelt M. 2014) (vgl. Funk et al. 2018).

Der Stand der Forschung beinhaltet einzelne Teillösungen, welche eine Aufwandsreduktion in der Informationsversorgung begünstigen; die Automatisierungspotenziale werden allerdings nicht vollständig ausgeschöpft. Alle untersuchten Teillösungen haben gemeinsam, dass nur ein geringer Automatisierungsgrad erreicht wird oder die Ansätze nur in sehr speziellen Anwendungsfällen einzusetzen sind, beispielsweise wenn ein Werkerführungssystem eines definierten Herstellers eingesetzt wird. Es fehlt ein ganzheitliches und durchgängiges Vorgehensmodell, welches bereits in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses und bei möglichst geringem manuellem Zeitaufwand eine vollständige Informationsversorgung von visuellen Werkerführungssystemen ermöglicht. Dieses fehlende Vorgehensmodell wird im Zuge dieser Dissertation entwickelt. Ziel der Arbeit ist somit die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme, um damit manuelle Aufwände im Informationsversorgungsprozess zu senken.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Als forschungsleitende Methode wird in der vorliegenden Arbeit die Design Science Research Methodology (DSRM) angewendet. Design Science Research beinhaltet die Schaffung neuen Wissens durch das Entwerfen von neuen und innovativen Artefakten, nachfolgender Anwendung sowie Analyse ihrer Leistungsfähigkeit (vgl. Peffers et al. 2018). Der Begriff „Artefakte“ schließt unter anderem Konstrukte, Modelle, Rahmenwerke, Methoden sowie deren Instanzierungen ein (vgl. Vaishnavi und Kuechler 2015). Nach HEVNER et al. steht in der Verhaltensforschung die Entwicklung und Verifizierung von Theorien zur Erklärung menschlichen beziehungsweise organisatorischen Verhaltens im Vordergrund, während das Design Science Paradigma die Erweiterung der Grenzen menschlicher beziehungsweise organisatorischer Fähigkeiten durch die Entwicklung und Anwendung von zuvor erwähnten innovativen Artefakten fokussiert (vgl. Hevner et al. 2004). In einer späteren Publikation erwähnen HEVNER et al. eine gute Eignung der Design Science Research zur Strukturierung sowie Legitimierung von Dissertationen und begründen die zunehmende Verbreitung dieser Methode durch wissenschaftliche Seminare an Universitäten (vgl. Hevner und Chatterjee 2010).

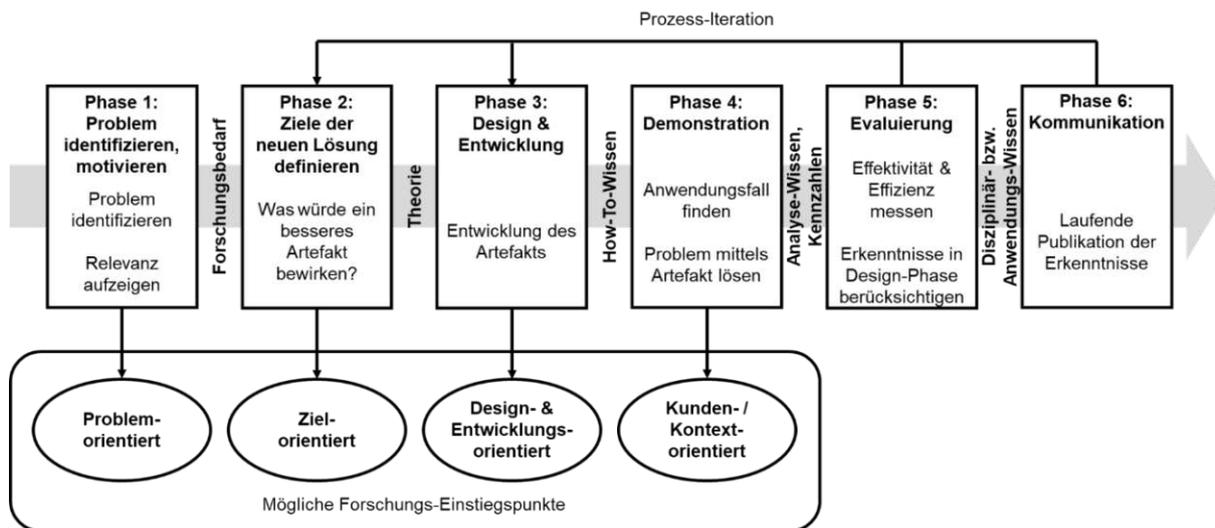


Abbildung 2: Nominalprozess DSRM (eigene Darstellung in Anlehnung an (Peffers et al. 2007))

Das 2007 von PEFFERS et al. definierte und in Abbildung 2 dargestellte Prozessmodell der Design Science Research Methodology fasst ausgewählte Literatur zur Design Science Research zusammen und bietet durch eine Aufteilung in sechs Phasen eine strukturierte Vorgehensweise für vorliegende Arbeit (vgl. Peffers et al. 2007) (vgl. Geerts 2011).

Die folgende Abbildung stellt den Aufbau der vorliegenden Arbeit, die Verortung der einzelnen Inhalte sowie die Einordnung in die sechs Phasen der Design Science Research Methodology übersichtlich dar.

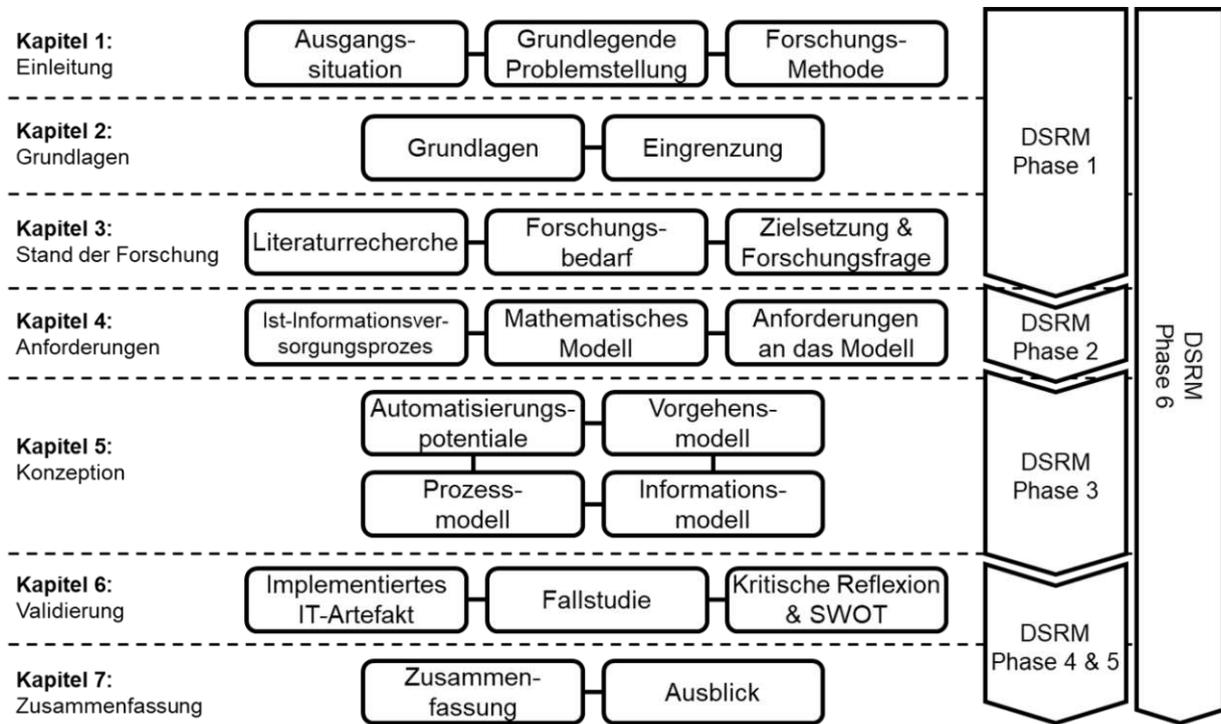


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit und Inhalt der einzelnen Kapitel

Kapitel 1 *Einleitung* führt den Leser an das Thema heran und gibt einen Überblick über die Arbeit. Ausgangssituation, Motivation, Problemstellung und allgemeine Zielsetzung werden beschrieben. Die forschungsleitende Methode wird erläutert und die einzelnen Phasen und Kapitel werden ausgeführt.

In Kapitel 2 *Grundlagen und Eingrenzung der Arbeit* erfolgt eine Beschreibung der theoretischen Grundlagen dieser Arbeit. Dabei werden die wesentlichen Grundbegriffe und Konzepte definiert, darunter Montagesysteme, visuelle Werkerführungssysteme sowie deren Informationsversorgung. Abschließend wird eine Eingrenzung des Untersuchungsbereichs vorgenommen und begründet.

Der Stand der Forschung zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme sowie eine Ableitung des Forschungsbedarfs wird in Kapitel 3 *Stand der Forschung und Forschungsbedarf* erläutert. Dabei werden ganzheitliche Ansätze sowie Forschungsvorhaben, welche für die vorliegende Arbeit relevant sind, hinreichend analysiert und anhand definierter Kriterien verglichen. Aus dieser Untersuchung wird anschließend der Forschungsbedarf identifiziert und die

Zielsetzung, Subzielsetzungen sowie Forschungsfrage formuliert. Kapitel 3 entspricht somit der ersten Phase der forschungsleitenden Methodik (*Problem identifizieren, motivieren*).

In Kapitel 4 *Ist-Analyse und Anforderungsableitung* erfolgt eingangs eine Analyse aktueller Prozesse zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme. Die Prozesse werden visualisiert und durch ein mathematisches Modell erweitert. Das ermöglicht in einem weiteren Schritt eine Quantifizierung der einzelnen zeitlichen Aufwände im Prozess sowie eine Ableitung der Anforderungen an das Vorgehensmodell. Das Kapitel entspricht der zweiten Phase der forschungsleitenden Methodik (*Ziele der neuen Lösung definieren*).

Kapitel 5 *Entwicklung des Vorgehensmodells* beschreibt die Konzeption des Vorgehensmodells, welches aus den Teilmodellen Prozess- und Informationsmodell besteht. Diese beiden Teil-Modelle werden formuliert und beschrieben. Das Zusammenwirken von Prozess- und Informationsmodell wird dargestellt. Das Kapitel entspricht der dritten Phase der forschungsleitenden Methodik (*Design & Entwicklung*).

In Kapitel 6 *Validierung durch Anwendung des Vorgehensmodells* wird das im Vorkapitel konzeptionierte Vorgehensmodell in ein IT- bzw. Software-Artefakt überführt. Es folgt die Validierung des Modells durch ein Fallbeispiel an realen Produkten in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0. Um Funktionsfähigkeit und Zeiteinsparungspotenzial zu messen, erfolgt eine technische sowie zeitwirtschaftliche Bewertung des Modells. Definierte Anforderungen werden validiert und das Vorgehensmodell wird im Zuge einer SWOT-Analyse kritisch reflektiert. Dieses Kapitel entspricht der vierten (*Demonstration*) und fünften Phase (*Evaluierung*) der forschungsleitenden Methodik.

In Kapitel 7 *Zusammenfassung und Ausblick der Arbeit* werden das durchgeführte Forschungsvorhaben sowie die Ergebnisse zusammengefasst und hinsichtlich Erfüllung der gestellten Zielsetzungen sowie Beantwortung der Forschungsfrage kritisch betrachtet. Abschließend erfolgt ein Ausblick zukünftiger Forschungsansätze im Bereich der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme.

## 2 Grundlagen und Eingrenzung der Arbeit

In diesem Kapitel erfolgt eine Darstellung der Grundlagen sowie eine Eingrenzung des Untersuchungsbereichs dieser Arbeit. Hierzu wird zunächst das Forschungsgebiet der Montagesysteme erläutert, welche industrielle Assistenzsysteme einbetten und somit in dieser Arbeit als Systemumgebung für visuelle Werkerführungssysteme betrachtet werden. Weiters werden aktuelle Entwicklungen von industriellen Assistenzsystemen im Allgemeinen sowie visuellen Werkerführungssystemen im Speziellen dargelegt und relevante Grundbegriffe werden erläutert. Zudem erfolgt eine Darstellung grundlegender Informationsversorgungsprozesse von visuellen Werkerführungssystemen. Abschließend erfolgt in diesem Kapitel eine Zusammenfassung des eingegrenzten Untersuchungsbereichs dieser Arbeit.

### 2.1 Montagesysteme

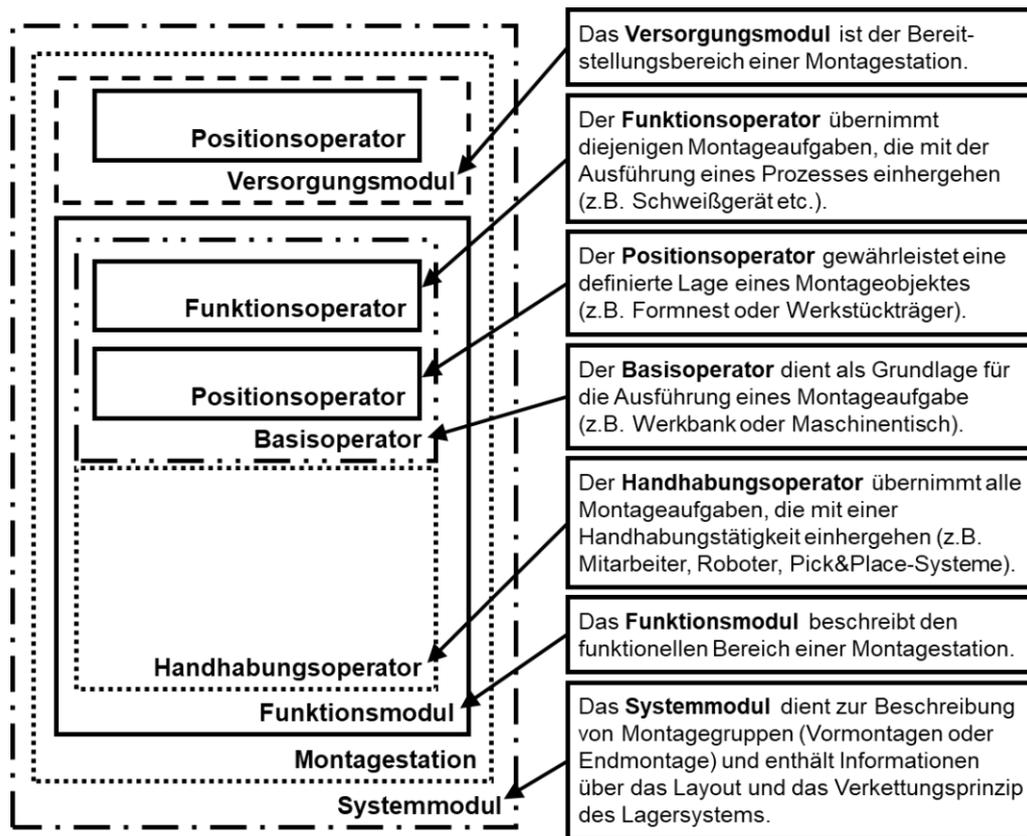
Assistenzsysteme beziehungsweise visuelle Werkerführungssysteme sind wichtige Komponenten innerhalb moderner Montagesysteme und unterstützen hierbei Mitarbeitende bei der Durchführung von Montagetätigkeiten. Umfang, Inhalt und Prozess dieser Unterstützungsleistung werden im Vorfeld der eigentlichen wertschöpfenden Tätigkeit geplant und modelliert. Nachfolgend werden Definition, Modellierung und Planung von Montagesystemen dargestellt und die wesentlichen Grundlagen aus der Literatur einbezogen.

#### 2.1.1 Grundlagen und Aufbau von Montagesystemen

Die VDI-Richtlinie 2860 definiert Montieren als „die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen“ und schließt dabei die Vorgänge Fügen, Werkstückhandhabung, Justieren, Kontrollieren und Sonderoperationen ein (Lotter und Wiendahl 2012). Ordnungsgemäße Montageprozesse erhöhen die Produktqualität, verringern Kosten und Markteinführungszeit und sind entscheidend, wenn Kunden hochvariante und maßgeschneiderte Produkte nachfragen (vgl. Durão et al. 2017). AEHNELT und BADER bezeichnen die Montage von Maschinen beziehungsweise Anlagen als einen essenziellen Bestandteil der Produktion und unterteilen diese in Vormontage (einzelne Bauteile zu Baugruppen erster Ordnung verbinden), Zwischenmontage (einzelne Bauteile und vormontierte Baugruppen zu Erzeugnissen höherer Ordnung verbinden) und Endmontage (Bauteile und Baugruppen höherer Ordnung zu Endprodukt zusammensetzen) (vgl. Aehnelt und Bader 2014).

Doch die Montage ist mehr als nur ein einfaches Zusammensetzen von Bauteilen nach vorgegebener Reihenfolge. Montageprozesse sind für 40-60% der Produktionszeit und 20-30% der Produktionskosten verantwortlich und eine möglichst optimale Planung und Gestaltung von Montageprozess, Montagesystem und Arbeitsmethode hat einen wesentlichen Einfluss auf den wirtschaftlichen Erfolg eines Produktionsunternehmens (vgl. Bahubalendruni und Biswal 2016). Ein Montageprozess besteht aus verschiedenen Aufgaben, welche spezifische Hilfsmittel erfordern und gemäß vorgegebener Rahmenbedingungen in einer bestimmten Reihenfolge ausgeführt werden. Die Planung von Montagereihenfolgen sowie von zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln wirkt sich dabei wesentlich auf die Leistung des Montagesystems aus (vgl. Kärcher und Bauernhansl 2019) (vgl. Leu et al. 2013). Montagesysteme werden definiert als „Arbeitssysteme, in denen ein oder mehrere Beschäftigte und/oder Arbeits- und Betriebsmittel auf Basis der Informationen des Arbeitsauftrages Montageobjekte (Produkte) aus Komponenten und/oder Baugruppen zusammenbauen“ (Bornewasser et al. 2018).

Auf Grund steigender Variantenvielfalt und kleineren Losgrößen haben Montagesysteme eine hohe Flexibilität aufzuweisen, damit diese für eine Vielzahl von Produkten und deren Ausprägungen anwendbar sind. In der Literatur wird „die besondere Notwendigkeit der wandlungsfähigen Gestaltung zukünftiger Montagesysteme“ hervorgehoben, sodass BACKHAUS et al. eine Modularisierung des Montagesystems vorschlagen. Dabei wird das Montage-Gesamtsystem in einzelne Module unterteilt, welche einen abgeschlossenen und unabhängigen Teil des Gesamtsystems darstellen und austauschbar sind (Backhaus et al. 2012).



**Abbildung 4: Module und Operatoren eines Montagesystems (eigene Darstellung in Anlehnung an (Feldmann K., Slama S., Gergs H.J., Wirth U. 2004))**

FELDMANN et al. ermöglichen eine Beschreibung des Aufbaus von Montagesystemen mittels Modulen und Operatoren, siehe Abbildung 4. Der Ort der Funktionsausübung wird als Funktionsmodul repräsentiert (beispielsweise eine Montagestation) und besteht aus Basis- und Handlungsoperator. Basisoperatoren stellen die Grundlage für Montagetätigkeiten dar, weisen selbst jedoch keine aktive Funktion auf (beispielsweise Arbeitstisch), während Handlungsoperatoren Aufgaben im Zuge einer Montagetätigkeit übernehmen (zum Beispiel Mitarbeiter oder Roboter). Basisoperatoren setzen sich weiters aus Funktions- und Positionsoperatoren zusammen. Funktionsoperatoren werden von einem Handlungsoperator geführt und übernehmen dabei die eigentliche Montagefunktion (zum Beispiel Schraubwerkzeug), während Positionsoperatoren zur Sicherung einer definierten Lage von Werkobjekten dienen (zum Beispiel Werkstückträger). Die Materialbereitstellung für Funktionsmodule wird durch Versorgungsmodule beschrieben, welche an eine Versorgungsquelle gekoppelt sind. Funktionsmodul und Versorgungsmodul ergeben zusammen die eigentliche Montagestation (vgl. Feldmann K., Slama S., Gergs H.J., Wirth U. 2004).

## 2.1.2 Cyberphysische Montagesysteme im Umfeld einer intelligenten Fabrik

Im Zuge der schrittweisen Digitalisierung von Produktionsprozessen im Sinne einer kognitiven beziehungsweise intelligenten Fabrik entwickelte sich der Begriff Smart Assembly. Darunter wird die Integration von Lernen, Anpassungsfähigkeit, Mensch-Maschine Kollaboration und modellbasierten Techniken in Montagesystemen zur Verbesserung von Produktivität, Kosten, Flexibilität, Reaktionsfähigkeit und Qualität verstanden (vgl. Durão et al. 2017). Dabei werden zur Umsetzung von Konzepten der intelligenten Fabrik – beispielsweise die Einbindung des Internet der Dinge (IoT) – cyberphysische Systeme herangezogen. Cyberphysische Systeme (CPS) werden als eingebettete Systeme gesehen, welche durch Sensoren physikalische Daten aufnehmen und mit Aktoren wiederum auf physikalische Vorgänge einwirken (vgl. Müller et al. 2015) (vgl. Riesener et al. 2021). Entscheidend ist dabei weiters eine rechentechnische Verarbeitung erfasster Daten sowie die Kommunikationsfähigkeit mit Objekten in lokalen sowie globalen Netzwerken zum Austausch von Daten (vgl. Dombrowski et al. 2013a). CPS werden als System von Systemen bezeichnet, sodass einzelne CPS zu übergeordneten CPS zusammengefügt werden. Dabei stellt ein Füllstandsensor einer Maschine ebenso ein CPS dar, wie die Maschine selbst ein CPS darstellt, welche diesen Füllstandsensor beinhaltet. Struktur und Aufbau von CPS werden laut BROY am besten durch ein Zwiebelschalenmodell dargestellt (vgl. Broy 2010) (vgl. Berger et al. 2019), siehe nachfolgende Abbildung.

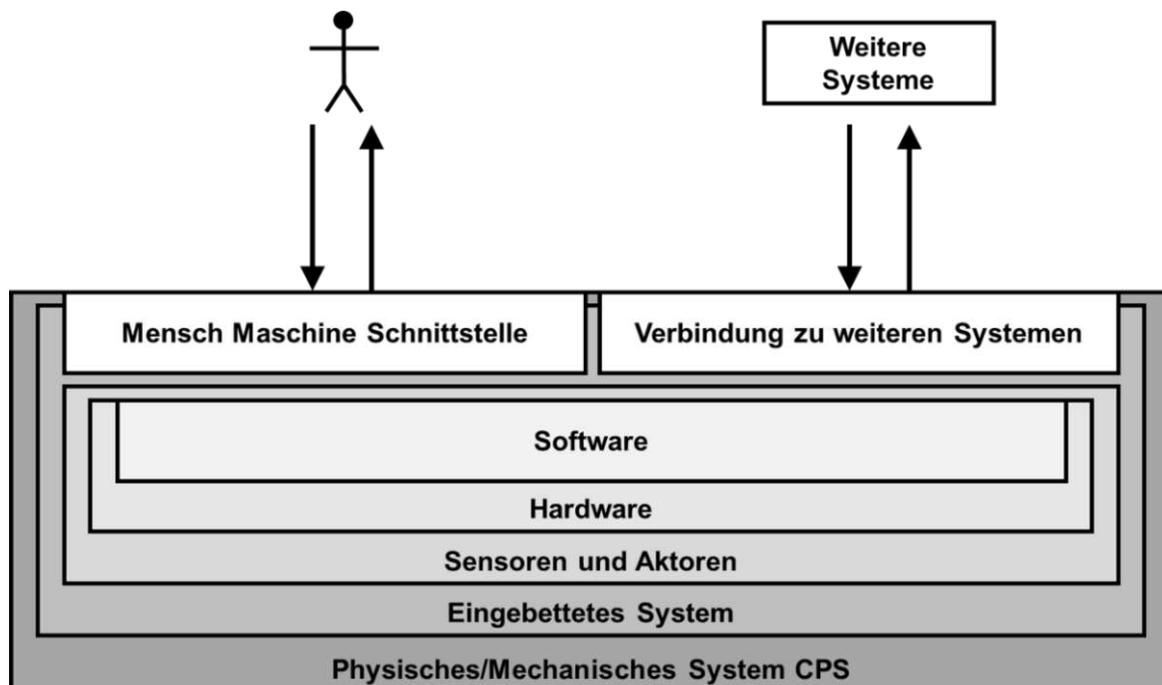


Abbildung 5: Zwiebelschalenmodell von CPS (eigene Darstellung in Anlehnung an (Broy 2010))

Werden CPS im Umfeld von Produktionsprozessen eingesetzt, sind diese als Cyberphysische Produktionssysteme (CPPS) zu bezeichnen. CPPS stellen einen Zusammenschluss mehrerer unabhängiger CPS zu einem Produktionssystem dar, welche sich durch eine starke Vernetzung auszeichnen und eine eigenständige Produktionseinheit darstellen (vgl. Pantförder et al. 2014) (vgl. Schuh et al. 2021). Daneben definieren RIBEIRO und HOCHWALLNER CPPS als eine Aggregation von Menschen, cyberphysischen Produktionsmodulen, Subsystemen und intelligenten Produkten, welche durch definierte Interaktionsschnittstellen kommunizieren. CPPS dienen zur Überwachung und Steuerung von Produktionsprozessen, Nutzung von generiertem Wissen von Mitarbeitenden und technischen Systemen während des Produktionsprozesses sowie Nutzung von Wissen, welches von hergestellten Produkten über deren Lebenszyklus generiert wird. Dabei entstehendes Wissen wird zur Verbesserung von Produktionsprozessen sowie zur Schaffung neuer Geschäftsmodelle genutzt und verschafft somit Hersteller und Kunden wichtige Vorteile (vgl. Ribeiro und Hochwallner 2018). CPPS ermöglichen ebenso eine neue Art der Architektur der Automatisierungs-IT, indem die in Schichten eingeteilte traditionelle Automatisierungspyramide schrittweise verlassen wird (vgl. Monostori et al. 2016), ein Wandel von zentraler zu dezentraler Kommunikation möglich wird und somit Informationen überall und jederzeit verfügbar sind (vgl. Müller et al. 2016b).

Cyberphysische Montagesysteme (CPMS) stellen einen Spezialfall von CPPS dar und zielen im Umfeld von Montageprozessen auf eine Berücksichtigung individueller Leistungsvermögen, Reduktion von Verschwendungen in Schnittstellen, ein hohes Maß an Harmonisierung sowie Steuerung komplexer Prozesse in hybriden Montagesystemen ab (vgl. Dombrowski et al. 2013b) (vgl. Ling et al. 2022). Hybride Montagesysteme „sind Einrichtungen zur Montage von Baugruppen und/oder Produkten, in denen Automatikstationen mit Handarbeitsplätzen“ kombiniert werden und hinsichtlich Stückzahl, Variantenvielfalt, Produktivität und Flexibilität zwischen manueller und automatisierter Montage eingeordnet werden (Lotter und Wiendahl 2012). Industrielle Montage gilt laut PFEIFFER et al. im aktuellen Diskurs überwiegend als einfache Arbeit und wäre auf Grund geringerer Qualitätsanforderungen leicht in Länder mit niedrigerem Lohnniveau transferierbar. Der Autor erläutert aber weiters, dass „einfache Arbeit“ wie beispielsweise Montage insbesondere in Deutschland ein relevantes Thema bleibt, da sich laut verschiedener Studien die Definition beziehungsweise Anforderungen an diesen Begriff ändern (vgl. Pfeiffer 2018). Die Kombination von hybriden, menschenzentrierten Arbeitssystemen mit cyberphysischen Systemen wird von vielen Autoren durch Begriffe wie Human Cyberphysical Production Systems (H-CPPS) (vgl. Romero et al. 2016b), human-centered

Automation (vgl. Malik und Bilberg 2019) oder Cyber-Physical Social Systems (CPSS) (vgl. Ansari et al. 2018) bezeichnet. Nach Ansicht der European Factories of the Future Research Association (EFFRA) ist die menschenzentrierte Gestaltung von Produktionssystemen eine Voraussetzung für flexible Produktionssysteme und eine erfolgreiche Anpassung an den demographischen Wandel (vgl. Sing et al. 2018). Die in den 1970er Jahren im Zuge der Vorstellung des Computer Integrated Manufacturing (CIM) vorgeschlagene menschenleeren Fabrik wird auch im Rahmen von Industrie 4.0 nicht zu erwarten sein. Damals wie heute spricht dagegen, dass der Mensch insbesondere in Produktionssystemen Eigenschaften aufweist, welche nicht oder nur sehr schwer auf Maschinen übertragbar sind, beispielsweise Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse oder die Generierung und Kommunikation von Erfahrungswissen mit seiner Umwelt (vgl. Haase et al. 2015). Zwar sind sich Experten einig, dass der Automatisierungsgrad weiter zunehmen wird, menschliche Arbeit aber nicht vollständig ersetzt wird, sondern sich von körperlichen Tätigkeiten hin zu steuernden beziehungsweise informationsverarbeitenden Tätigkeiten verschiebt (vgl. Mayer et al. 2012). Kognitive Technische Systeme (KTS) sollen dabei „mit Werkern flexibel interagieren beziehungsweise sie bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten unterstützen“, sodass Vorteile manueller Montageabläufe (zum Beispiel Flexibilität, Adaptivität, Zuverlässigkeit) mit den Vorzügen automatisierter Montageanlagen (hohe Ausbringung, hohe Genauigkeit) kombiniert werden (Zäh et al. 2010). In diesen sozio-technischen Systemen wirken nach GORECKY et al. beziehungsweise HAASE et al. menschliche Mitarbeitende in cyberphysischen Systemen direkt auf physische Komponenten, beziehungsweise über eine Benutzerschnittstelle ebenso auf virtuelle Komponenten ein, siehe nachfolgende Abbildung (vgl. Haase et al. 2015).

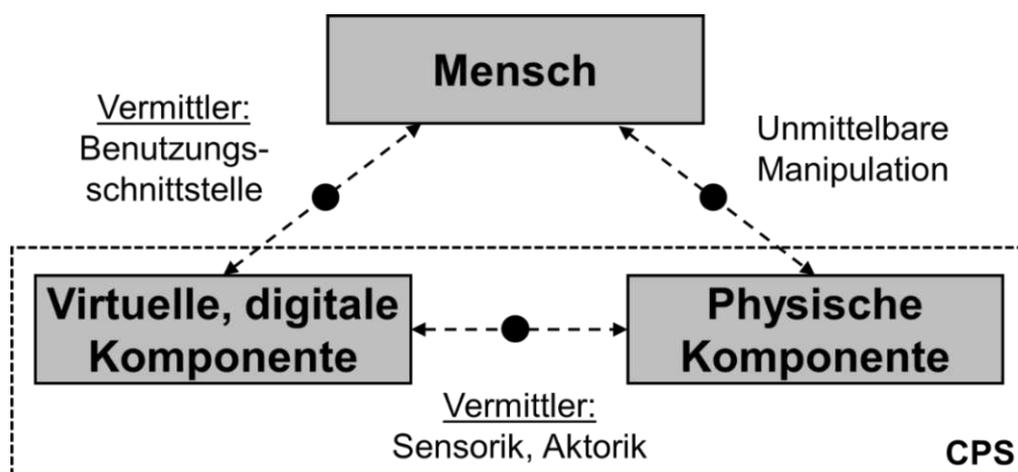


Abbildung 6: Der Mensch als Akteur in einem Cyberphysischen System (eigene Darstellung in Anlehnung an (Haase et al. 2015))

Treten Mensch und Maschine in einem gemeinsamen sozio-technischen System auf, wird die Rolle des Menschen entweder als „in the Loop“ oder „in the Mesh“ bezeichnet. Im Falle von Human-in-the-Loop (dt. sinngemäß übersetzt „Mensch in der Schleife“) übernimmt der Mensch die Überwachung und Anpassung von Sollwerten, die direkte Steuerung des Systems, fungiert als Datenquelle zur Identifizierung oder Früherkennung von Situationen und meldet Abweichungen beziehungsweise Störungen an das System (vgl. Fantini P., Tavola G., Taisch M., Barbosa J., Leitao P., Liu Y., Sayed M.S., Lohse N. 2016). Human-in-the-Mesh (dt. sinngemäß übersetzt „Mensch im Netz“) bezeichnet hingegen die Rolle des Menschen als Empfänger von Warnungen, Identifizierung von mit diesen Warnungen in Verbindung stehenden Situationen sowie Analyse und Anpassung von Plänen (vgl. Fantini P., Tavola G., Taisch M., Barbosa J., Leitao P., Liu Y., Sayed M.S., Lohse N. 2016).

Um die hohe Varianz innerhalb von Montagelinien zu beherrschen, werden zwei unterschiedliche Herangehensweisen vorgeschlagen. Entweder werden auf einer Montagelinie mehrere Lose gleicher Produktmodelle gebildet und diese nacheinander montiert. Dies führt zu einer hohen Komplexität der Produktionsplanung, da Lose gebildet werden, Bestände aufgebaut und damit Durchlaufzeiten erhöht werden. Alternativ hat sich das Konzept der Mixed Model Montagesysteme entwickelt (vgl. Palmqvist et al. 2020). Dabei werden auf einer Montagelinie eine Vielzahl ähnlicher Produktvarianten gleichzeitig und kontinuierlich montiert, ohne dass Lose gebildet werden (vgl. Hu et al. 2011). Dies ermöglicht eine flexible, wandlungsfähige und kapazitätsauslastende Produktion von ähnlichen Produkten. Einzelne Montagestationen sind ausreichend flexibel zu gestalten, um ihre jeweiligen Aufgaben bei unterschiedlichen Varianten zu erfüllen. Herausforderungen liegen hierbei in der generischen Produktmodellierung, Linienausgleich, Materialversorgung sowie in der zeitlichen Planung der Reihenfolge der verschiedenen Modelle (vgl. Harari et al. 2015).

Mit dem immer weiter verbreiteten Konzept der Mixed Model Montage ist ein zunehmender manueller Anteil von Montagetätigkeiten zu beobachten. Die Rolle des Menschen in der Montage hat sich seit Beginn der ersten industriellen Revolution schon umfangreich geändert. Wesentliche Treiber sind und waren dabei stets die Kundennachfrage, Variantenvielfalt der Produkte und daraus resultierende Losgrößen (vgl. Hu et al. 2011) (vgl. Palmqvist et al. 2020). Bemerkenswert ist ebenso eine Veränderung der Wichtigkeit von Wissen in Produktions- beziehungsweise Montagesystemen. Während im 20. Jahrhundert noch Maschinen und Anlagen das wertvollste Kapital eines Unternehmens darstellten, tritt an diese Stelle im 21. Jahrhundert das Wissen und die Produktivität der Mitarbeitenden (vgl. Hannola et al. 2018). FANTINI et al. verweisen auf verschiedene Publikationen und fassen

zusammen, dass Arbeitsplätze, welche eine hohe Routinemäßigkeit, jedoch nur geringe manuelle Geschicklichkeit oder soziale Interaktion erfordern, anfälliger für eine Substitution durch Technologie (zum Beispiel automatisierte Anlagen) sind, während analytische, interaktive und problemlösende Fähigkeiten immer mehr gefragt sind (vgl. Fantini et al. 2018). Bezogen auf Montagetätigkeiten sind Mitarbeiter gefordert, welche neue Fertigkeiten wie beispielsweise Programmierung oder Datenanalyse beherrschen oder bereit sind, diese zu erlernen. Weiters ist zu beobachten, dass operative Montagetätigkeiten auf Grund der geringen Losgröße nicht mehr im Vorhinein eingelernt, sondern während der eigentlichen wertschöpfenden Montagetätigkeiten erlernt werden (vgl. Ansari et al. 2018). Ebenso wird sich die Montageplanung verändern, sodass Montageplaner und Montagemitarbeitende gefordert sind, im Sinne einer schrittweisen Verbesserung von Montagesystemen, Wissen beziehungsweise Know-How auszutauschen, sodass dieses aus der eigentlichen wertschöpfenden Tätigkeit in die Planung zurückfließt (vgl. Pfeiffer 2018).

### 2.1.3 Prozessmodellierung und Planung von Montagesystemen

Ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit bezieht sich auf eine effiziente Planung sowie Abbildung von Montageprozessen. Es erfolgt eine Definition wesentlicher Begriffe wie Prozess, Prozessmodellierung, Arbeitsvorbereitung sowie Überführung dieser Begriffe in den Kontext von Montageprozessen.

Der Begriff Prozess wird vielfältig verwendet und beschreibt nach ROLLAND eine zusammenhängende Reihe von Aktivitäten, deren Ergebnis ein Produkt ist, wie beispielsweise ein konzeptionelles Schema, ein implementiertes Informationssystem oder ein physisches Erzeugnis. In diesem Zusammenhang tritt der Begriff Prozessmodell als eigentliche Beschreibung des Prozesses auf und gibt damit an, wie etwas durchgeführt wird (vgl. Rolland 1993). Andere Quellen kommen auf ähnliche Definitionen: So beschreiben BERKI et al. ein Prozessmodell als eine Methode oder eine Methodik zur Entwicklung von Systemen, welche Schritte und Hinweise angeben, wie und in welcher Reihenfolge etwas ausgeführt wird, um ein Artefakt zu entwickeln (vgl. Berki et al. 2004).

Montagesysteme werden mittels gängiger Modellierungssprachen wie beispielsweise Unified Modeling Language (UML), Web Ontology Language (OWL) oder Systems Modeling Language (SysML) modelliert und beschrieben. STRANG et al. entwickelten ein Konzept für eine Beschreibungsmethodik cyberphysischer Produktionssysteme auf Basis von UML und definieren dazu die Modellierung von Ressourcen, Produkten, Montageprozessen, des Störungsmanagements sowie der Montageorganisation (vgl. Strang et al. 2014). Das vollständige Konzept wurde anschließend von Strang im Zuge seiner Dissertation veröffentlicht und im Detail beschrieben (vgl. Strang 2016).

Strang versucht dabei in seiner Dissertation eine Definition von Montageprozessen in CPMS herauszuarbeiten. In einem klassischen Montagesystem beschreibt der Begriff Montageprozess einen „von der Montageplanung vorgegebenen Prozess, welchen die Einzelteile und Baugruppen durchlaufen müssen, um zu einem Erzeugnis zusammengeführt zu werden“ (Strang et al. 2014). Auf den Begriff eines cyberphysischen Montageprozess spezifiziert, werden zusätzlich die „physischen und virtuellen Eigenschaften“ sowie eine Kopplung ebendieser berücksichtigt. Ein wesentlicher Unterschied ist weiters, dass in CPMS nicht nur eine einzige Montageprozessreihenfolge möglich ist, sondern „mehrere, alternative Montageprozessreihenfolgen“ denkbar sind, wodurch „unterschiedliche Prozessvarianten sowie Ausweichprozesse“ zugelassen werden (Strang et al. 2014).

Planen bezeichnet „das systematische Suchen und Festlegen von Zielen sowie von Aufgaben und Mitteln zum Erreichen dieser Ziele“ (Feldmann K., Slama S., Gergs H.J., Wirth U. 2004). FELDMANN et al. unterschieden dabei zwischen komplementären (Verfolgung eines Zieles fördert die Erreichung eines anderen Zieles), konkurrierenden (Verfolgung eines Zieles hemmt die Erreichung eines anderen Zieles) und indifferenten Zielen (Verfolgung eines Zieles hat keinerlei Einfluss auf die Erreichung der anderen Ziele) (vgl. Feldmann K., Slama S., Gergs H.J., Wirth U. 2004). Der Arbeitsvorbereitung (AV) kommt innerhalb der Produktionsplanung eine besondere Bedeutung zu (vgl. Leye 2012) und umfasst die „Gesamtheit aller Maßnahmen einschließlich der Erstellung aller erforderlichen Unterlagen und Betriebsmittel, die durch Planung, Steuerung und Überwachung für die Fertigung von Erzeugnissen ein Minimum an Aufwand gewährleistet“ (Rudolf 2007). Arbeitsvorbereitung wird weiters unterteilt in Fertigungssteuerung und Arbeitsplanung: Der Begriff Arbeitsplanung umfasst einmalig auftretende Planungsmaßnahmen, welche unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit eine fertigungsgerechte Herstellung von Produkten sicherstellen. Davon abgegrenzt umfasst der Begriff Fertigungssteuerung sämtliche Maßnahmen, welche für eine laut Arbeitsplanung definierte Auftragsabwicklung erforderlich sind (vgl. Rudolf 2007) (vgl. Krä et al. 2020).

Der Begriff der Montageplanung wird als ein Vorgang beschrieben, bei welchem „ein technisches System gebildet wird, das in der Lage ist, eine vorgegebene Montagetätigkeit unter Erfüllung bestimmter Randbedingungen durchzuführen“ (Leye 2012). Die Planung von Montagesystemen ist eine wichtige Aufgabe der Produktionsplanung und wird abhängig von Granularität und Detaillierungsgrad in Makro- und Mikroplanung unterteilt. Die Makroplanung befasst sich mit dem Rüsten von Montageanlagen, der Identifizierung von Montageaufgaben und der Reihenfolgeplanung ebendieser Montageaufgaben auf Stationsebene. Davon abgegrenzt wird die Mikroplanung, welche eine Festlegung von Details für einzelne Arbeitsgänge, eine Beschreibung von Montageschritten, Auswahl von Werkzeugen und Erstellung von Roboterprogrammen beinhaltet (vgl. Hu et al. 2011). Dabei wird eine Vielzahl von Aspekten miteinbezogen, wie beispielsweise die Struktur des Produkts, verfügbare Montagetechnologie, Vorrichtungen und Werkzeuge, Toleranzen, Bewegungspfade, Fähigkeiten und Qualifikationen von Mitarbeitenden, Ergonomie sowie Kosten und Aufwände (vgl. Kardos et al. 2017).

Auf Grund erhöhter Planungsfrequenz und damit einhergehenden ansteigenden Planungsaufwänden ist eine Unterstützung des Montageplanungsprozesses durch digitale Werkzeuge ein wesentlicher Hebel, um eine verbesserte Effizienz in der Montageplanung zu gewährleisten (vgl. Siedelhofer et al. 2018). Der Begriff der

computerunterstützten Montageplanung beziehungsweise Computer-Aided Assembly Planning (CAAP) beschreibt die Unterstützung des Planungsprozesses beispielsweise durch eine automatisierte Ableitung, Bewertung und Selektion von optimalen Montagereihenfolgen. LEU et al. nennen jedoch drei Einschränkungen derartiger Systeme: Der Rechenaufwand steigt exponentiell mit der Bauteileanzahl, es wird kein Expertenwissen des Monteurs miteinbezogen und es erfolgt keine menschliche Interaktion, wodurch wirtschaftlich sowie ergonomisch ungünstige Körperhaltungen nicht beurteilt werden. Diese Einschränkungen haben dazu geführt, dass sich derartige Systeme zu sogenannten virtuellen Assembly Simulationen weiterentwickelt haben (vgl. Leu et al. 2013).

### 2.1.4 Zusammenfassung und Fazit

Die Montage von komplexen Produkten stellt einen wesentlichen Bestandteil der industriellen Güterproduktion dar. Im Zuge der Digitalisierung der Industrie (Industrie 4.0) entwickelte sich das Konzept der cyberphysischen Systeme, welche – im Umfeld der Montage angewandt – auch als cyberphysische Montagesysteme bezeichnet werden und unter anderem eine Verbesserung der Produktivität und Qualität sowie eine Senkung der Montagekosten zum Ziel haben. Montagesysteme haben auf Grund steigender Variantenvielfalt und kleineren Losgrößen eine hohe Flexibilität aufzuweisen. Dies wird durch eine Modularisierung des Montage-Gesamtsystems ermöglicht. Cyberphysische Montagesysteme unterstützen diese Modularisierung durch einen einfachen und schnellen Austausch physischer Montagekomponenten, als auch durch eine automatische Anpassung von Softwareteilen und Prozessparametern. Dadurch wird es möglich, moderne Produktionsparadigmen wie Mass Customization und Mass Individualization trotz gleichbleibender Kosten zu Serienkonditionen umzusetzen. Entscheidend ist dabei eine effiziente Planung dieser Montagesysteme, welche u.a. die Erstellung von Unterlagen und Betriebsmittel, Planung, Steuerung und Überwachung der Prozesse sowie deren Erzeugnisse unter Einhaltung der Ziele (zum Beispiel Kosten, Qualität) beinhaltet. In der Literatur werden Fragestellungen im Themenfeld der Montageplanung unterschieden in eine montagegerechte Gestaltung von Produkten, Montagereihenfolgeplanung, Montagekonfiguration, Austaktung von Montagelinien sowie Montagearbeitsplatzgestaltung. Der Mensch spielt dabei trotz steigendem Automatisierungsgrad sowohl heute als auch zukünftig eine wichtige Rolle in Montagesystemen, sowohl in der Entwicklung und Planung, als auch in der eigentlichen Produktionsausführung. In cyberphysischen Systemen interveniert ein menschlicher Akteur unmittelbar über physische als auch virtuelle Komponenten mit dem Gesamtsystem. Durch den Wandel hin zu geringeren Losgrößen hat sich jedoch

die Arbeitsweise innerhalb von Montagesystemen geändert, sodass neue Fertigkeiten wie beispielsweise Programmierung, Datenanalyse und effizientes Erlernen neuer Abläufe ebenso wichtig geworden sind, wie die eigentliche wertschöpfende Montagetätigkeit selbst.

## 2.2 Visuelle Werkerführungssysteme

Werkerführungssysteme werden in der Literatur den informatorischen Assistenzsystemen zugeordnet und im nachfolgenden Unterkapitel detailliert dargestellt. Dabei wird zunächst eine Definition und Einordnung der Begrifflichkeiten versucht, die Gruppe der informatorischen Assistenzsysteme beschrieben und die darin verarbeiteten beziehungsweise ausgegebenen Werkerinformationen diskutiert.

### 2.2.1 Industrielle Assistenzsysteme in der Produktion

Die Autoren der Studie „Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand“ vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Industrie definieren den Begriff Assistenzsystem als Zusammenfassung aller Technologien, welche „die Beschäftigten bei der Ausführung ihrer Arbeit unterstützen und ihnen ermöglichen, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren“. Dies umfasst die Informationsbereitstellung durch Visualisierungssysteme, verschiedene mobile Endgeräte, Berechnungshilfsmittel sowie motorische Unterstützung von Menschen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2015). Eine ähnliche Definition geben HINRICHSSEN et al. und beschreiben ein Assistenzsystem als ein technisches System, welches Prozessinformationen von der Umgebung erhält und verarbeitet, um damit Menschen bei der Durchführung ihrer Tätigkeiten zu unterstützen. Dies umfasst ebenso automatisierte Eingriffe in gefährlichen Situationen (vgl. Hinrichsen S., Riediger D., Unrau A. 2016).

Der Begriff Assistenzsystem ist breit gefasst und das allgemeine Verständnis ist unterschiedlich. Nach Straub et. al kann jedes technische System, welches Menschen bei der Erreichung ihrer Ziele beziehungsweise bei der Reduktion von Aufwänden hilft, als Assistenzsystem bezeichnet werden (vgl. Traub et al. 2018) (vgl. Mark et al. 2021). Assistenzsysteme werden nicht ausschließlich zur Unterstützung von Beschäftigten oder Mitarbeitern genutzt, sondern finden auch in anderen Bereichen sowie im gesellschaftlichen Alltag weite Verbreitung. So wird ein Navigationssystem in einem Fahrzeug ebenso als Assistenzsystem verstanden und FahrerIn beziehungsweise Fahrer werden hinsichtlich des korrekten Weges angeleitet (vgl. Wiesbeck 2013). Im Kontext dieser Arbeit werden unter dem Begriff Assistenzsystem nachfolgend

ausschließlich industrielle Assistenzsysteme verstanden, welche die Unterstützung von Mitarbeitern im industriellen Umfeld verfolgen.

Morphologische Kästen dienen der Klassifikation industrieller Assistenzsysteme und teilen das breite Feld in verschiedene Ausprägungsformen und Anwendungsmöglichkeiten. HINRICHSEN et al. präsentieren eine Morphologie von Assistenzsystemen in der manuellen Montage und unterscheiden diese unter anderem nach Art der Unterstützung, Ausprägung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, Darstellungsart von Ausgabeinformationen oder Installationsaufwand (vgl. Hinrichsen S., Riediger D., Unrau A. 2016). Ein von FELLMANN et al. dargestelltes Rahmenwerk unterscheidet zusätzlich den Technologiereifegrad der Anwendung sowie die Methode zur Generierung der dargestellten Informationen (vgl. Fellmann et al. 2017). Abhängig von der Art der Systemunterstützung wird in der Literatur zwischen energetischer und informatorischer Assistenz unterschieden (vgl. Rusch et al. 2021):

(a) Energetische Assistenzsysteme umfassen unter anderem kollaborierende Roboter, intelligente Schraubwerkzeuge sowie Exoskelette und gewährleisten damit eine effiziente Ausführbarkeit der Aufgabe sowie eine Reduktion der körperlichen Belastung des menschlichen Bewegungsapparates (vgl. Hinrichsen et al. 2018). Im Falle einer Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) arbeiten Mensch und Roboter ohne trennende Schutzeinrichtungen innerhalb eines gemeinsamen kollaborativen Arbeitsraums zusammen. Durch eine geeignete Arbeitsteilung wird so eine Erhöhung der Produktionskapazitäten, Verbesserung der Ergonomie sowie Steigerung der Prozessqualität erreicht (vgl. Ranz et al. 2017) (vgl. Oubari 2020).

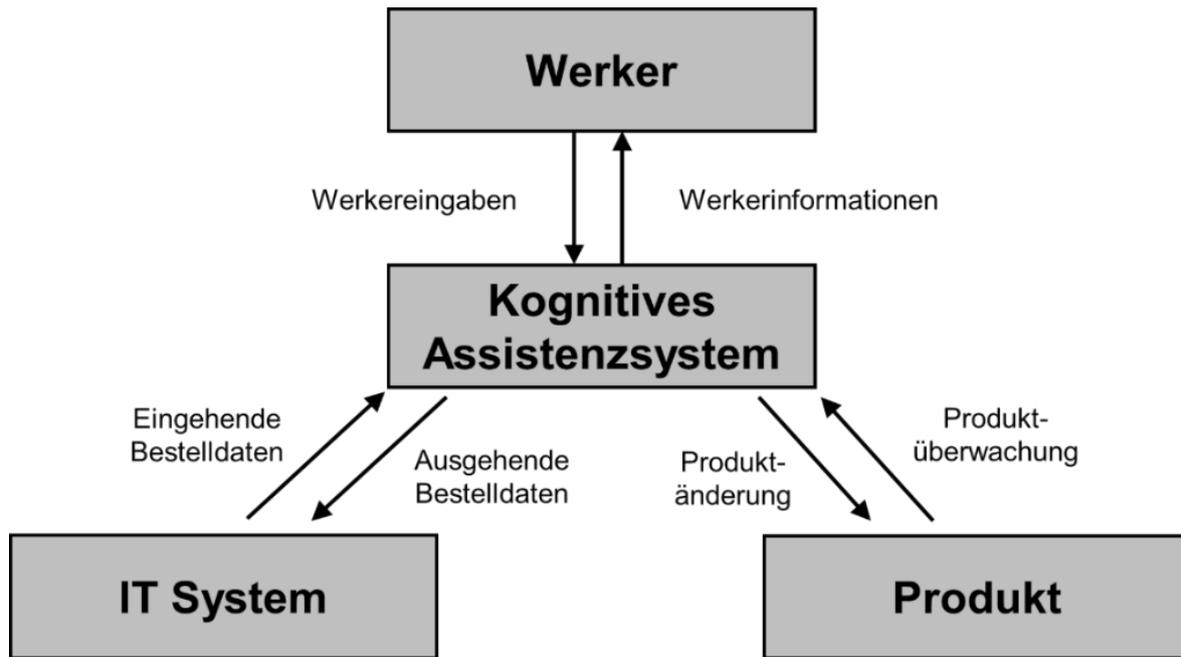
(b) Informatorische Assistenzsysteme gewährleisten hingegen die Bereitstellung von korrekten Informationen zur richtigen Zeit in effizienter Art und Weise (vgl. Fischer et al. 2016), aber auch einen durchgehenden Informationsaustausch zwischen Mitarbeitenden und einem führenden Informationssystem (beispielsweise ERP oder MES). Dabei soll ein effizientes Arbeiten und die Vermeidung von Unterbrechungen, Fehlern und qualitätsrelevanten Problemen sichergestellt werden (vgl. Aehnelt und Bader 2015b). Informationsassistenz wird dabei in fünf grundlegende Arten unterschieden (vgl. Aehnelt und Bader 2014):

- Bewusstmachen von Veränderungen
- Anleiten von Arbeitsaufgaben
- Überwachen der Arbeitsausführung
- Dokumentation der Arbeitsausführung und der Arbeitsergebnisse
- Verhindern kognitiver oder physischer Überlastungen

## 2.2.2 Informatrische Assistenzsysteme

Viele Produktionsunternehmen arbeiten nach wie vor mit Standardprozess-Anleitungen auf Papier. Diese papierbasierten Montageanleitungen enthalten eine Vielzahl an redundanten Informationen. Die eingeschränkte Darstellungsart der Informationen führt insbesondere bei komplexen Aufgaben dazu, dass Montagemitarbeitende diese falsch interpretieren oder mit hohen zusätzlichen Such- und Abstimmungsaufwänden belastet werden (vgl. Hou et al. 2013). Kürzere Produktlebenszyklen und steigende Variantenvielfalt führen darüber hinaus zu zahlreichen Problemen beim Einsatz papierbasierter Montageanleitungen. Insbesondere eine regelmäßige Erstellung beziehungsweise Anpassung von Anleitungen gestaltet sich schwierig. KARDOS et al. empfehlen den Einsatz eines digitalen Werkerinformationssystems sowie eine automatisierte Bereitstellung der Werkeranleitungen (vgl. Kardos et al. 2018). Eine an die aktuelle Produktvariante angepasste Bereitstellung von Montageanleitungen in Echtzeit durch ein elektronisches System führt laut HANNOLA et al. zu höherer Produktivität, größerer Autonomie der Mitarbeitenden und letztendlich zu höherer Arbeitszufriedenheit (vgl. Hannola et al. 2018).

Werkerinformationssysteme (WIS) stellen benötigte „Informationen zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Form“ einer Werkerin beziehungsweise einem Werker zur Verfügung und unterstützen damit „die Wahrnehmung in der menschlichen Handlungsabfolge zur Erledigung einer Arbeitsaufgabe, indem sie den Werker über von ihm verlangte Tätigkeiten informieren“ (Teubner et al. 2016). Die Darstellung der Information erfolgt in digitaler Form unter anderem mittels Bildschirmen, Augmented Reality oder Virtual Reality und umgeht damit die dargestellten Probleme einer papierbasierten Montageanleitung (vgl. Fischer et al. 2015). In der Literatur werden die Begriffe Werkerinformationssystem, digitales Assistenzsystem sowie kognitives Assistenzsystem an vielen Stellen synonym verwendet (vgl. Merkel et al. 2019a). Kognitive Assistenzsysteme ermöglichen eine Kommunikation zwischen Montagemitarbeitenden, IT-Systemen sowie Produkt (vgl. Merkel et al. 2019b) und stellen dadurch relevante Informationen direkt dar, wodurch Such- und Abstimmungsaufwände reduziert werden. Trotz steigender Komplexität von Montageprozessen ermöglichen kognitive Assistenzsysteme eine Reduktion von Fehlern sowie eine Steigerung der Produktivität (vgl. Merkel et al. 2019a). Nachfolgende Abbildung 7 stellt das Rahmenwerk des Informationsflusses eines kognitiven Assistenzsystems dar:



**Abbildung 7: Rahmenwerk des Informationsflusses eines kognitiven Assistenzsystems (eigene Darstellung in Anlehnung an (Merkel et al. 2019a))**

Nach MERKEL et al. ergeben sich daraus folgende Möglichkeiten für einen Informationsfluss zwischen Werker, IT-Systemen und Produkt (vgl. Merkel et al. 2019a):

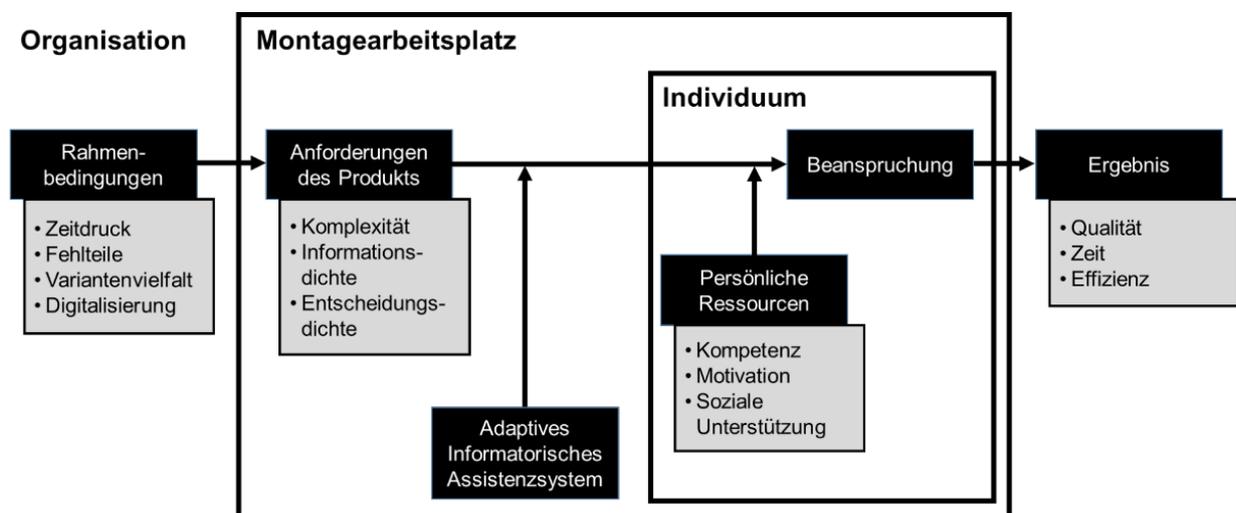
- Ausgabe von Informationen an Werkerin / Werker
- Eingabe von Informationen durch Werkerin / Werker
- Versand von Auftragsdaten an übergeordnete IT-Systeme
- Empfang von Auftragsdaten aus übergeordneten IT-Systemen
- Produkt durch Aktoren manipulieren
- Produkt durch Sensoren überwachen

Kognitive Assistenzsysteme, welche wahrnehmende und entscheidende Tätigkeiten kombinieren, werden als Werkerführungssysteme (WFS) bezeichnet und unterscheiden sich von WIS durch das Vorhandensein einer Feedbackschleife in Form eines bidirektionalen Informationsflusses (vgl. Teubner et al. 2019). WFS vermitteln Inhalte (Was), Vorgehensweisen (Wie) und Konzepte (Warum) und führen damit die Mitarbeitenden durch einen manuellen Arbeitsprozess. Darstellungsform und Tiefe der Werkerführung sind abhängig von der gewählten Zielsetzung der Assistenz (vgl. Aehnelt und Bader 2015a). WFS werden zur Führung der Mitarbeitenden durch Montage-, Instandhaltungs- und Rüstprozesse eingesetzt und geben standardisierte Instruktionen aus. Als Interaktionsgeräte werden fest installierte Bildschirme oder mobile Geräte (beispielsweise Datenbrille oder Tablet) eingesetzt (vgl. Quint et al.

2016). Diese sind mit verschiedenen Datenquellen innerhalb des Unternehmens verbunden, sodass Geräte sowie die damit arbeitenden Mitarbeitenden Teil eines cyberphysischen Systems (CPS) werden (vgl. Andersen et al. 2018). Smart Devices beziehungsweise Smart Wearables ermöglichen damit eine Interaktion des Menschen mit Social Machines. Diese von ROMERO et al. auch als Social Software Systems bezeichneten Systeme ermöglichen die Führung von Werkerinnen und Workern in zunehmend komplexen cyberphysischen Systemen durch Nutzung von künstlicher Intelligenz, virtuellen Assistenten oder Chatbots (vgl. Romero et al. 2017).

### 2.2.3 Werkerinformationen in visuellen Werkerführungssystemen

Informationen, welche von WFS an Mitarbeitende – respektive Werker – vermittelt werden, werden als Werkerinformation bezeichnet und sind nach TEUBNER et al. als dynamische Informationen in Abhängigkeit von Produkt und Produktionsprozessen zu verstehen. Montageinstruktionen stellen einen Spezialfall von Werkerinformationen dar und sind laut einer Studie effektiver, wenn nicht nur Anfangs- und Endzustand eines Produktes dargestellt wird, sondern auch Zwischenschritte visualisiert werden (vgl. Heiser et al. 2004).



**Abbildung 8: Informationsverarbeitungsmodell in der manuellen Montage (eigene Darstellung in Anlehnung an (Bornewasser et al. 2018))**

Abbildung 8 stellt ein von BORNEWASSER et al. definiertes Informationsverarbeitungsmodell in der manuellen Montage dar, welches die drei Ebenen Organisation, Arbeitsplatz und Individuum abbildet. Mittels eines adaptiven informativen Assistenzsystems werden an Montagemitarbeitende Rahmenbedingungen und externe Anforderungen vermittelt, welche diese kognitiv verarbeiten und in Montagetätigkeiten zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe umsetzen. Im

Fälle kleiner Losgrößen (Mehrproduktmontage) kommt es zu höheren mentalen beziehungsweise kognitiven Beanspruchungen, welche sich negativ auf das Ergebnis (Qualität, Zeit, Effizienz) auswirken (vgl. Bornwasser et al. 2018). Von Mitarbeitenden der manuellen Montage wird auf Grund der steigenden Varianz zu montierender Produkte gefordert, eine Vielzahl an möglichen Kombinationen von Arbeitsschritten in hochvarianten Arbeitsprozessen zu beherrschen. Die daraus resultierende hohe kognitive Belastung wird durch assistierende Maßnahmen und Weiterentwicklung der Mitarbeiterkompetenzen reduziert (vgl. Dollinger C., Lock C., Reinhart G. 2016).

Um der menschlichen Intuition gerecht zu werden, entwickelten MATTSON und FAST-BERGLUND fünf Richtlinien zur Darstellung von Informationen in komplexen Endmontageprozessen (vgl. Mattson und Fast-Berglund 2016):

1. Darstellung relevanter Informationen zur Unterstützung aktiver kognitiver Prozesse: Werden zu viele Informationen zugleich dargestellt, besteht die Gefahr, wichtige Informationen zu übersehen und dadurch Fehler zu machen.
2. Die subjektive Wahrnehmung von Situationen beeinflusst das menschliche Verhalten: Die richtige Wahl der Informationsausgabeart (Text, Bild, Video etc.) ist entscheidend.
3. Fähigkeiten und Grenzen von Menschen berücksichtigen: Gedächtnis und Aufmerksamkeit sind begrenzt, sodass es erforderlich ist, Informationen auf das Wesentliche zu reduzieren und unmissverständlich darzustellen. Bei der Erstellung von Bildern ist eine Verwechslung ähnlicher Objekte vorzubeugen und Hilfsobjekte wie beispielsweise Pfeile oder Nummern zu nutzen.
4. Individuelle Präferenzen und Differenzen beachten: Menschen unterschiedlichen Alters beziehungsweise Herkunft weisen Unterschiede in Bezug auf Hör- und Sehvermögen sowie physischen Aspekten wie beispielsweise Körpergröße auf. Dieser Sachverhalt ist bei der Erstellung von Werkeranweisungen zu beachten.
5. Wahrnehmung der Platzierung der Werkerinformationen unterstützen: Es ist auf eine eindeutige Platzierung der Werkerinformationen am Gesamtprodukt zu achten, beispielsweise durch Beigabe eines Bilds eines fertig montierten Produkts.

Nachfolgend wird der Begriff Werkerinformationen weiter differenziert: Im Kontext montageführender Werkerinformationssysteme unterscheiden LUSIC et al. zwischen direkten und indirekten, statischen und dynamischen sowie realen und virtuellen Werkerinformationen (vgl. Lušić 2017): Direkte Werkerinformationen beeinflussen den Werker unmittelbar (beispielsweise Darstellung der zu montierenden Bauteilkomponenten), während indirekte Werkerinformationen die Erstellung von

Werkerinformationen sowie deren Zufluss zum Werker beeinflussen – beispielsweise wird aus einer Baugruppenstruktur (indirekte Werkerinformation) eine Montagereihenfolge (direkte Werkerinformation) abgeleitet (vgl. Lušić 2017). Die Autoren unterscheiden weiters zwischen statischer und dynamischer Übermittlung von Werkerinformationen. Texte und Bilder sind zeitunabhängig und damit statische Informationen. Mitarbeitende interpretieren diese statischen Informationen und übersetzen diese in einzelne Handlungsschritte, wodurch zusätzlicher kognitiver Aufwand erforderlich wird. Die dynamische Bereitstellung von Informationen, zum Beispiel von Videos oder 3D-Animationen, führt zu einer geringeren kognitiven Belastung, die Dauer der Informationsdarstellung ist jedoch an die Bedürfnisse einzelner Mitarbeiterinnen beziehungsweise Mitarbeiter anzupassen (vgl. Lusic et al. 2013). Der Begriff *Individuelle Information* wird dabei zusätzlich als auf eine individuelle Werkerin beziehungsweise einen individuellen Werker angepasste Werkerinformation definiert und zeichnet sich durch Anpassung des Informationsgrades an die Qualifikation der Werkerin beziehungsweise des Werkers aus (vgl. Teubner et al. 2019). Reale Werkerinformationen erfordern für ihre Erstellung reale Objekte und Prototypen und beinhalten mit einer Kamera aufgenommene Fotos oder Videos, während virtuelle Werkerinformationen digital abgeleitet werden, zum Beispiel mittels einer 3D-CAD- oder Rendering-Software (vgl. Lusic et al. 2013).

Eine 2013 von WIESBECK veröffentlichte Studie zeigt, dass Anweisungen und Assistenz in der Montage deutscher Unternehmen vorwiegend mittels traditioneller Gestaltungselemente wie Texten (74,5%), Tabellen / Listen (70,2%) und Zeichnungen (74,5%) ausgeführt wurden. Ein großer Teil der Unternehmen plant eine Reduktion dieser traditionellen Gestaltungselemente und einen vermehrten Einsatz von Animationen und Videos innerhalb von drei Jahren (vgl. Wiesbeck 2013). Eine Animation wird als eine Reihe von schnell wechselnden, computergenerierten Bildern definiert, welche einem Betrachter die Bewegung von Objekten suggerieren (vgl. Höffler und Leutner 2007). Ein Vergleich zwischen Animationen und Standbildern zeigte, dass diese im Großteil der Untersuchungen keine Vorteile gegenüber Standbildern hatten, beziehungsweise wenn sie Vorteile geboten haben, dann deshalb, weil mehr Informationen in der animierten als in der statischen Version verfügbar waren (vgl. Höffler und Leutner 2007). Eine von GONG et al. veröffentlichte Studie vergleicht unterschiedliche Unterstützungsformen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die zeitliche und qualitative Leistung von Montagemitarbeitenden sowie deren emotionale Beanspruchung. Textbasierte Montageanweisungen wiesen dabei die geringste emotionale Beeinflussung, aber auch die schlechteste resultierende Leistung auf. Eine videobasierte Unterstützung ermöglichte eine hohe

Qualität der Montageprozesse, zog allerdings höhere Ausführungszeiten nach sich (vgl. Gong et al. 2017).

Zusammengefasst haben Werkerinstruktionen für Montageprozesse folgende Informationen zu beinhalten:

- Montagereihenfolge der Bauteile und Baugruppen des Produkts (vgl. Li et al. 2018)
- Visuelle Darstellung der im aktuellen Montageschritt zu verbauenden Bauteile und Baugruppen des Produkts (vgl. Hou et al. 2013)
- Parameter und Abmessungen (vgl. Hou et al. 2013)
- Technische Anforderungen an Qualität, Installations- und Prüfvorschriften (vgl. Hou et al. 2013)
- Hinweise auf potenzielle Fehler und wie diese vermieden werden (vgl. Li et al. 2018)
- Möglicher Einbaupfade zur Gewährleistung einer kollisionsfreien Montage (vgl. Kardos et al. 2018)

Werden einem Montagemitarbeitenden zu viele Informationen dargestellt, wird es herausfordernd, zwischen relevanten und peripheren Informationen zu unterscheiden. Der Informationsgehalt von Werkerinstruktionen ist somit an die Erfahrung des Informationsempfängers sowie dessen persönliche Präferenzen anzupassen. JOHANSSON et al. empfehlen zusätzlich die Anpassung des Layouts der Werkerinformationen, sodass an erfahrene Mitarbeitende hauptsächlich Stücklisteninformationen wie Teilennamen und Teilenummern ausgegeben werden, während Anfänger schrittweise Anleitungen mit Bildern und mehrsprachigen Texten erhalten (vgl. Johansson et al. 2018). STORK und SCHUBÖ weisen auf die Wichtigkeit einer hohen Auffindbarkeit relevanter Informationen hin. Der Begriff wurde ursprünglich im Kontext des Web-Designs definiert und beschreibt die Fähigkeit der Nutzer, Inhalte eines Dokuments zu identifizieren, durch verschiedene Bereiche des Dokuments zu navigieren, um schlussendlich relevante Informationen zu extrahieren. Das Gütekriterium der Auffindbarkeit wird ebenso auf die Darstellung von Informationen bei der manuellen Montage angewendet, sodass kein Vorwissen erforderlich ist, um Montageanleitungen effizient zu lesen (vgl. Stork und Schubö 2010).

## 2.2.4 Zusammenfassung und Fazit

Assistenzsysteme unterstützen Mitarbeitende bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten und ermöglichen diesen, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren. Die in dieser Arbeit betrachteten Werkerführungssysteme werden in der Literatur der Gruppe informatorischer Assistenzsysteme zugeordnet. Informatorische Assistenzsysteme unterstützen Mitarbeitende durch die Bereitstellung von relevanten Informationen in effizienter Form. Typische Funktionen sind die Aus- und Eingabe von Informationen an beziehungsweise durch den Werker, die Überwachung und Kontrolle von Prozessschritten oder die beidseitige Kommunikation mit einem übergeordneten IT-System. Die dabei vom Mitarbeiter aufgenommenen Informationen werden als Werkerinformationen bezeichnet und sind in Abhängigkeit von Produkt und Prozess zu verstehen. Montageinstruktionen stellen dabei einen Spezialfall von Werkerinformationen dar. Die Darstellung beziehungsweise das Design von Werkerinformationen beeinflusst dabei wesentlich die potenziell erzielbare Effizienz- und Effektivitätssteigerung. Dabei werden Texte, Tabellen und Listen, Zeichnungen, Animationen, Bilder und Videos unterschieden. An informatorische Assistenzsysteme werden eine Vielzahl von Anforderungen gestellt, um eine hohe Benutzerfreundlichkeit und eine damit einhergehende positive Nutzerakzeptanz zu gewährleisten, wie beispielsweise intuitive Gestaltung von Benutzeroberflächen oder Möglichkeiten einer effizienten Fehlerkorrektur. Um Unternehmen bei der Planung, Einführung, Implementierung und Evaluierung von Assistenzsystemen zu unterstützen, wurden im wissenschaftlichen Umfeld mehrere Vorgehensmodelle sowie Konzepte entwickelt. Diese lehnen sich meist an klassische Vorgehensmodelle zur Einführung von Softwaresystemen an und sind in die Phasen Analyse des Ist-Zustands, Konkretisierung der Ziele, Grobplanung, Feinplanung, Realisierung, Einsatz und Nutznachweis unterteilt. Als wesentliche Auswirkungen von Assistenzsystemen konnten in zahlreichen Studien und Versuchen eine Reduktion von Ausführungs-, Einlern- und Trainingszeiten, eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und Qualität der unterstützten Prozesse sowie die Inklusion leistungsgewandelter Mitarbeiter nachgewiesen werden.

## 2.3 Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme

Bevor Werkerinformationen zur Unterstützung von Mitarbeitenden genutzt werden, ist es erforderlich, diese im Vorfeld zu erstellen und in geeigneter Form zu speichern. FELLMANN et al. unterscheiden grundsätzlich zwischen Darstellung und Erstellung von Informationen zur Unterstützung von Werkerinnen und Werkern: Der Begriff der Informationsdarstellung beschreibt, wie die Darstellung der Informationen in Bezug auf

die Komplexität erreicht wird. Dabei wird zwischen einfacher (beispielsweise akustische Piep Signale), intermediärer (beispielsweise Symbole und Schritte) und komplexer Informationsdarstellung (beispielsweise Prozessmodelle) unterschieden (vgl. Fellmann et al. 2017). Die Informationserstellung hingegen beschreibt, wie relevante Informationen erstellt werden. Dabei unterscheiden die Autoren zwischen automatisierter (beispielsweise durch softwarebasierte Algorithmen), semi-automatisierter (beispielsweise durch eine Kombination von menschlicher und künstlicher Intelligenz) und manueller Erstellung.

Der Begriff Informationsversorgung (engl. Information Supply) wurde von REISINGER et al. im Kontext visueller Werkerführungssysteme definiert und umfasst dabei die Informationserstellung (engl. Information Creation) sowie die Informationseintragung (engl. Information Entry). Während Informationserstellung alle Tätigkeiten umfasst, welche zur eigentlichen Erstellung von Werkerinformationen nötig sind (beispielsweise Erarbeitung eines Montageplans, Ableitung von Anweisungstexten, Bildern oder Videos), beschreibt der Begriff Informationseintragung den Prozess der Eintragung dieser zuvor automatisiert oder manuell erstellten Informationen in ein visuelles Werkerführungssystem (vgl. Reisinger et al. 2020). Nachfolgend werden grundlegende Methoden und Ansätze in der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme dargestellt und dabei zugrunde gelegte produktbeschreibende Daten definiert.

### **2.3.1 Methoden und Werkzeuge der manuellen Informationsversorgung**

Bei der Erstellung von Werkerinformationen ist sicherzustellen, dass diese für den Informationsempfänger verständlich aufbereitet werden und alle Informationen enthalten, welche dieser benötigt, um eine Aufgabe möglichst effizient und fehlerfrei durchzuführen. Haug definiert dazu den Begriff der Instruktionsqualität, welche sich nicht nur auf Korrektheit, sondern ebenso Eindeutigkeit, Vollständigkeit und Aussagekraft von Werkerinformationen bezieht (vgl. Haug 2015). Die Wahl einer geeigneten Darstellung ist dabei stark vom Informationsempfänger abhängig. Einsteiger bevorzugen beispielsweise eine animierte Darstellung von Montageanleitungen, während erfahrene Mitarbeiter auf Grund des geringeren Aufmerksamkeitserfordernisses statische Informationen präferieren (vgl. Paelke und Röcker 2015).

Nachfolgend werden einzelne Teillösungen der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme dargestellt, welche auf Grund ihres manuellen Charakters (Methoden) zusammengefasst werden:

- Authoring mit systemspezifischen Backend-Editoren
- Authoring mit systemunabhängigen Backend-Editoren
- Programming by Demonstration (Teach-In)

Authoring mit systemspezifischen Backend-Editoren: Der Begriff Authoring beschreibt allgemein die Erstellung von Inhalten für Informationssysteme und bezieht sich im Falle von visuellen Werkerführungssystemen auf das Festlegen der Arbeitsinhalte, die Formulierung von Texten, Erstellung von Bildern und Animationen sowie die Aufbereitung von 3D-Modellen. Authoring Tools sind definiert als Software-Applikationen, welche von Nicht-Programmierern bedient werden und eine graphische Benutzeroberfläche zur Erstellung und Eingabe der Werkerinformationen bieten (vgl. Zogopoulos et al. 2022) (vgl. Bhattacharya und Winer 2015). Der Begriff wird in der Literatur mannigfaltig verwendet und in vorliegender Arbeit nach der Höhe des Unterstützungsgrades unterteilt:

- Systemspezifische Editoren mit geringem Unterstützungsgrad (zum Beispiel Backend-Eingabemasken eines Werkerführungssystem eines spezifischen Herstellers)
- Werkerführungssystem-unabhängige Software-Pakete mit hohem Unterstützungsgrad (zum Beispiel Cortona 3D Rapidauthor)

Systemspezifische Editoren werden meist von Mitarbeitenden der Arbeitsvorbereitung verwendet, welche Experten im jeweiligen Anwendungsfeld (zum Beispiel Montage) sind und über eine ausgeprägte Erfahrung in CAD-Modellierung und der Bedienung des jeweiligen Werkerführungssystems sowie zugehörigen Editors verfügen (vgl. Zauner et al. 2003) (vgl. Wolfartsberger et al. 2017). In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an Werkerführungslösungen sowie zugehörige systemspezifische Editoren sowohl im akademischen als auch industriellen Sektor entwickelt und verwendet. Ein am Lehrstuhl FAPS entwickelter Editor AgeniA ermöglicht durch eine zielgerichtete Benutzerführung und durch Zuhilfenahme von Vorranggraphen eine effiziente Erstellung von Text- und Multimedia-Inhalten (vgl. Franke und Risch 2009). Ein weiteres Beispiel eines systemspezifischen Editors aus dem akademischen Sektor ist eine von ZOBEL et al. beschriebene Webapplikation zur Modellierung von Prozessmodellen und Inhalten für Datenbrillen (vgl. Zobel et al. 2018). Authoring Tools werden unter anderem bei der Informationsversorgung für Werkerführungssysteme mittels Augmented Reality (AR) Technologie angewendet. Dabei werden Anwendende dieser Authoring Tools bei Erstellung sowie Import von 3D-Modellen, Animationen und

2D Textinformationen unterstützt (vgl. Bhattacharya und Winer 2015). Dabei wird auf das Forschungsvorhaben ARVIDA (Angewandte Referenzarchitektur für virtuelle Dienste und Anwendungen) verwiesen, welches technische sowie wirtschaftliche Potenziale zum Einsatz von virtuellen Techniken untersucht. Die Autoren weisen darin auf die wissenschaftlich herausfordernde und wirtschaftlich höchst interessante Problematik der automatischen Datenbereitstellung für AR-Anwendungen hin (vgl. Schreiber et al. 2017).

Werkerführungssystem-unabhängige Software-Pakete: Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen systemspezifischen Editoren mit geringem Unterstützungsgrad, ermöglichen Werkerführungssystem-unabhängige Authoring-Tools einen höheren Unterstützungsgrad bei der Erstellung sowie Einspeisung von Werkerinformationen und sind darüber hinaus nicht auf ein spezifisches Werkerführungssystem als Empfänger dieser Informationen beschränkt. Am Markt erhältliche Software-Lösungen unterstützen Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung bei der Definition von Montageprozessen, indem ein 3D-CAD-Modell des zu montierenden Produkts mit Verbindungsinformationen erweitert wird, wie beispielsweise Drehmomente von Schraubverbindungen oder Form und Abmessung von Schweißverbindungen. Um Zeit zu sparen, werden Data-Mining-Algorithmen herangezogen, welche eine automatische Ableitung relevanter Montageinhalte von in der Vergangenheit geplanten, ähnlichen Produktvarianten ermöglichen. Weiters wird eine Schätzung der Montagezeit sowie -kosten zur Verfügung gestellt (vgl. Rulhoff et al. 2013). Die Wiederverwendung von Daten aus dem Engineering Prozess wird als geeigneter Weg zur Gewährleistung eines aufwandsarmen Authoring-Prozesses empfohlen (vgl. Stock et al. 2005), beispielsweise durch den Einsatz von Schablonen, welche häufig verwendete Teilprozesse als parametrisierbare Blöcke in einer Planungssoftware zur Verfügung stellen. Diese Methode wird zur Reduktion der Aufwände bei der Erstellung von Animationen für Wartungsarbeiten herangezogen (vgl. Knöpfle et al. 2005). Durch eine virtuelle Demonstration des Montagevorgangs erstellen Mitarbeitende beispielsweise selbständig Trainingsanleitungen, ohne Kenntnisse in Programmierung und ohne Durchführung komplexer geometrischer Transformationen (vgl. Gupta 2012). Abseits akademischer Entwicklungen werden im industriellen Umfeld verschiedene kommerzielle Authoring-Systeme mit hohem Unterstützungsgrad angeboten und von Unternehmen zur einfachen und aufwandsarmen Erstellung von Arbeitsanweisungen eingesetzt. MOHR et al. beschreiben die Verwendung der 3D-Computergrafik-Software 3DS MAX sowie Maya. Mitarbeitende greifen dabei auf eine Vielzahl an Funktionen zurück, welche auch bei der Entwicklung von Computerspielen und von Videoeffekten eingesetzt werden (vgl. Mohr et al. 2015). Um den

Einlernprozess von Montagemitarbeitenden möglichst effektiv und effizient zu gestalten, wurden virtuelle, umgebungsbasierte Trainingssysteme (VTS) entwickelt. Zur Erstellung der Trainingsinhalte wird dabei die zugehörige Software Virtual Author verwendet, welche als Plug-In für die 3D-CAD-Software ProEngineer eingesetzt wird und Anwendern neben einer intuitiven 3D-Benutzeroberfläche eine Vielzahl an Funktionen zur automatischen Erstellung von Animationen und Anweisungstexten bietet (vgl. Brough et al. 2007).

Programming by Demonstration (Physisches Teach-In): In den vorangehenden Kapiteln wurde die Herausforderung beschrieben, dass Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung bei der Erstellung von Informationen für visuelle Werkerführungssysteme ausgeprägte Kenntnis in CAD-Modellierung, Programmierung beziehungsweise Bedienung der graphischen Benutzeroberflächen der Backend-Editoren aufweisen müssen. Dies führt zu höheren Personal- und Schulungskosten sowie Unsicherheiten in der Arbeitsvorbereitung. Um diesem Umstand entgegen zu treten, wurden Ansätze entwickelt, mit welchen Montagetätigkeiten durch einmalige Demonstration an einem physischen oder virtuellen Prototypen aufgenommen werden, um daraus automatisch den erforderlichen Anleitungsinhalt für Werkerführungssysteme zu erstellen (vgl. Bächler et al. 2018). FUNK et al. betiteln diesen Ansatz als Programming by Demonstration (PbD, dt. Programmierung durch Demonstration) und weisen auf die Notwendigkeit einer natürlichen Interaktion sowie Nutzung von Gesten und Bewegungen zur Informationsversorgung eines projektionsbasierten Werkerführungssystems hin. Dabei werden Arbeitsinhalte erstellt, indem ein erfahrener Mitarbeiter den eigentlichen Montageprozess durchführt und dieser durch Kameras und Tiefensensoren aufgezeichnet und in Anleitungselemente übersetzt wird. Anzuführen sind hier jedoch der frühe Reifegrad des Aufbaus sowie derzeitige Limitierungen wie beispielsweise hohe Kosten oder ein schlechter Wirtschaftlichkeitsgrad bei geringen Losgrößen (vgl. Funk et al. 2017) (vgl. Funk et al. 2018). SCHUH et al. präsentieren weiters ein „App-basiertes Konzept [...], welches auf Grundlage eines Autorensystems ein ‚Mitschreiben‘ während des Aufbaus von Prototypen“ ermöglicht. Dabei steht eine „aufwandsarme Erstellung der Planung durch eine videobasierte Prozessaufnahme in einer frühen Phase der Produktentwicklung“ im Fokus. Das Mitarbeiterwissen soll so „während des Aufbaus des Prototyps ‚mitgeschrieben‘ werden“ (Schuh et al. 2018). Ein früherer Ansatz verzichtet auf die Demonstration von Montagevorgängen an physischen Prototypen und versucht diesen Prozess in einem virtuellen Autorensystem abzubilden (vgl. Schwartz et al. 2007). Ähnlich der zuvor beschriebenen Variante an physischen Prototypen, wird die Montage in diesem Fall

virtuell durchgeführt, wodurch kein physischer Prototyp erforderlich ist, jedoch erneut die Problematik in den Vordergrund tritt, dass Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung beziehungsweise die Prozessexperten am Shop Floor (zum Beispiel Schichtleiter, Meister) in vielen Fällen keine ausgeprägte Erfahrung in Bedienung der Softwarepakete beziehungsweise Computer aufweisen.

### 2.3.2 Automatisierte Ansätze und Verfahren der Informationsversorgung

Die Begriffe Automatisierung und Automation leiten sich vom griechischen Wort Automatos ab und bedeuten laut HAUSS und TIMPE „sich selbst bewegend, aus eigenem Antrieb“. Laut KAIN werden beide Begriffe in vielen Quellen synonym verwendet, während verschiedene Autoren eine klare Abgrenzung beider Begriffe definieren: Dabei definiert Hacker den Begriff Automatisierung als den Prozess des Automatisierens (zum Beispiel eine vormals manuell durchgeführte Tätigkeit mechanisieren), während der Begriff Automation das Ergebnis dieses Prozesses (zum Beispiel mechanisierter Prozess ohne menschlichen Eingriff) darstellt. Unter Automation wird somit „die Unterstützung oder Ausführung von Aufgaben durch technische Systeme verstanden, welche vormals allein durch den Menschen bewältigt wurden“ (Kain 2016).

Hinsichtlich der Entwicklung der zukünftigen Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine unterschied BRÖDNER zwischen einem technozentrischen und einem anthropozentrischen Weg (vgl. Brödner 1990). DWORSCHAK und ZAISER unterschieden diese beiden Wege analog für die Entwicklung von cyberphysischen Systemen und bezeichneten sie als Automation Scenario beziehungsweise Tool Scenario. Während im Automation Scenario immer mehr Entscheidungen von IT-Systemen übernommen werden, dient Technologie im Tool Scenario als (Entscheidungs-)Unterstützungssystem, sodass sich Mitarbeitende auf die Gestaltung und Optimierung von Prozessen konzentrieren und nur im Bedarfsfall eingreifen (vgl. Dworschak und Zaiser 2014).

Im Umfeld cyberphysischer Systeme tritt vermehrt das Paradigma des Cognitive Computings auf. Dieses verfolgt das Ziel, Menschen bei der Lösung von Problemen zu unterstützen, indem menschliche Entscheidungsprozesse auf künstliche Modelle und Algorithmen übertragen werden (vgl. Ansari et al. 2017). Im Zuge dieser Arbeit werden Algorithmen zur automatisierten Verarbeitung von Daten verwendet, um daraus beispielsweise neue Daten, Informationen und Wissen abzuleiten. Harel und Feldman definieren den Begriff Algorithmus als ein abstraktes Rezept, welches einen Prozess vorschreibt, welcher von einem Menschen, einem Computer oder einem

anderen Akteur ausgeführt wird. Der Fokus der Anwendung von Algorithmen liegt in Bereichen, in welchen ein zuvor von einem Menschen durchgeführter Prozess von einem Computer auszuführen ist (vgl. Harel und Feldman 2004). CORMEN et al. geben eine ähnliche Definition und beschreiben einen Algorithmus als ein wohldefiniertes Berechnungsverfahren, welches einen Wert beziehungsweise eine Menge von Werten als Eingabe heranzieht und daraus einen Wert beziehungsweise eine Menge von Werten als Ausgabe erzeugt. Ein Algorithmus wird somit als eine Folge von Berechnungsschritten beziehungsweise als Werkzeug zur Lösung eines spezifizierten Berechnungsproblems betrachtet (vgl. Cormen et al. 2001). Im Umfeld digitaler Assistenzsysteme werden Algorithmen zur Unterstützung von menschlichen Mitarbeitenden herangezogen, indem Daten verarbeitet werden und daraus kontextspezifische Informationen generiert und zur Verfügung gestellt werden (vgl. Andersen et al. 2018).

Nachfolgend werden einzelne Teillösungen der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme dargestellt, welche auf Grund ihres automatisierten Charakters (Algorithmen) wie folgt zusammengefasst werden:

- Automatische Ableitung von Montagereihenfolgen
- Fallbasiertes Schließen in der Montageplanung
- Automatische Erstellung von Text- und Bildinformationen
- Schnittstellen visueller Werkerführungssysteme

Automatische Ableitung von Montagereihenfolgen durch Assembly Sequence Planning (ASP): Eine der aufwändigsten Tätigkeiten im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme ist die Erstellung des Arbeitsplans – respektive Montageplans – und eine damit verbundene Vorgabe der Montagereihenfolge. Die Reihenfolge, in welcher ein Produkt montiert wird, hat einen wesentlichen Einfluss auf Gestaltung des Montagearbeitsplatzes, Dauer der Montagetätigkeit sowie Qualität des montierten Produkts (vgl. Hu et al. 2011). Seit den Achtzigerjahren wurden von Forschern eine Vielzahl an Herangehensweisen entwickelt, um Montagereihenfolgen von Produkten automatisiert abzuleiten. Diese werden nach MOUSSA und ELMARAGHY in vier Grundtypen gegliedert: Generisch, Generativ, Wiederherstellung und Hybrid (vgl. Moussa und ElMaraghy 2019). Ein Liason Diagramm ist ein Graph, welcher Verbindungen (Liasons) einzelner Baugruppen beziehungsweise Bauteile (Parts) eines Produktes darstellt und als Grundlage für die Ableitung von möglichen Montagereihenfolgen dient, welche durch eine automatische Generierung von Ja-Nein-Fragen sowie Beantwortung dieser Fragen durch einen menschlichen Operator möglich wurden (vgl. Fazio und Whitney 1987). Um Aufwände des menschlichen Planers weiter zu senken, entwickelten

HOMEM DE MELLO und SANDERSON 1991 eine Methode, welche auf eine Beantwortung von Fragen verzichtete und stattdessen geometrische Informationen des zu montierenden Produkts heranzog. Dabei wurden Und/Oder-Graphen erstellt, welche eine Darstellung aller möglichen Montageprozesse ermöglichen, woraus in einem weiteren Schritt alle möglichen Montagereihenfolgen abgeleitet werden (vgl. Homem de Mello, Luiz S. und Sanderson 1991). Die entwickelte Methode reduzierte die erforderliche manuelle Interaktion, es wurde jedoch ein Mensch zur Erstellung des Und/Oder-Graphen sowie zur Überprüfung der abgeleiteten Montagereihenfolgen benötigt. Weiters fehlte eine Ableitung der optimalen Montagesequenz mittels bestimmter Kriterien wie beispielsweise Anzahl erforderlicher menschlicher Handgriffe, Zeit oder Kosten (vgl. Pan 2005). 1992 veröffentlichten DINI und SANTOCHI eine Methode zur weiteren Steigerung des Automatisierungsgrades. Dabei wurde der gesamte Prozess zur Ermittlung von Montagesequenzen automatisiert, während geometrische Produktinformationen weiterhin manuell bereitgestellt werden. Dabei dienen die drei Matrizen Interference Matrix, Contact Matrix und Connection Matrix als Input. Diese enthalten Informationen über die grundsätzliche Montierbarkeit der einzelnen Bauteile entlang kartesischer Koordinatenachsen. Der manuelle Aufwand war geringer als dies bei vorhergehenden Ansätzen der Fall war, jedoch wurden auch mittels dieser Methode keine optimalen Montagereihenfolgen ausgewählt (vgl. Dini und Santochi 1992). Eine Vielzahl der nachfolgenden Forschungsansätze zielte auf die Reduktion manueller Interaktionen ab, indem sowohl Pre-Prozesse (Vorbereitung), als auch Post-Prozesse (Nachbereitung) möglichst automatisiert wurden (vgl. Pan 2005). Zur Automatisierung der Pre-Prozesse erarbeiteten GU und YAN eine Methode zur automatischen Extraktion von Produktinformationen aus 3D-CAD-Modellen. Dabei wird eine feature-basierte Repräsentation des zu montierenden Produktes genutzt und mittels eines vierschritten Prozesses werden anschließend mögliche Montagereihenfolgen abgeleitet (vgl. Gu und YAN 1995). ENG et al. beschrieben 1999 einen ähnlichen Ansatz und veröffentlichten diesen als "Feature-based assembly modeling and sequence generation". Dabei wurde der Begriff „Kinematic Pair Liaison Diagram“ (KPLD) geprägt, wodurch die Freiheitsgrade eines 3D-CAD-Modells anhand von Matrizen und Merkmalen (Features) der einzelnen Komponenten ermittelt werden (vgl. Eng et al. 1999). Die Mehrheit der gegenwärtigen Forschungsvorhaben zur automatischen Montagereihenfolgenplanung nutzen 3D-CAD-Modelle als Eingangsinformation, sodass Kontakte, Freiheitsgrade oder geometrische Abmaße ohne zuvor durchgeführte manuelle Pre-Prozesse genutzt werden (vgl. Mathew und Rao 2010). Die parallele Entwicklung zur automatisierten Durchführung der Post-Prozesse ermöglichte, aus allen ermittelten, eine optimale Montagereihenfolge

auszuwählen. KANAI et al. kombinieren die automatische Ableitung der Montagereihenfolge mit Systemen vorbestimmter Zeiten, um die optimale Montagereihenfolge auszuwählen. Die Autoren nennen dabei unterschiedliche Bewertungsmöglichkeiten, wie beispielsweise Anzahl der Werkzeugwechsel, zeitgleiche Ausführung von manuellen Arbeitsschritten oder die Stabilität des Gesamtaufbaus (vgl. Kanai et al. 1996). SMITH und SMITH entwickelten 2002 einen genetischen Algorithmus, um optimale Montagesequenzen zu ermitteln. Dabei wurden die möglichen Montagereihenfolgen hinsichtlich der Anzahl der benötigten Montageoperationen sowie der Kosten verglichen. Die für diesen Algorithmus benötigten Matrizen sind manuell durch Analyse des 3D-CAD-Modells zu erstellen (vgl. Smith und Smith 2002) (vgl. Pan 2005). Die Anzahl der möglichen Montagereihenfolgen steigt exponentiell mit der Teileanzahl. So sind bereits für ein einfaches Produkt Millionen unterschiedlicher Montagereihenfolgen möglich. Zwischen 25 und 40% sind beispielsweise auf Grund ihrer Produktgeometrie nicht montierbar und somit aus dem Lösungsraum zu entfernen. Von den verbleibenden Montagereihenfolgen sind lediglich 5-15% praktikabel sowie geometrisch stabil montierbar. Aus dieser Menge wird im Anschluss die nach gewissen Kriterien bewertete optimale Montagesequenz bestimmt (vgl. Bahubalendruni und Biswal 2016). Es wurden viele Forschungsarbeiten durchgeführt, um den Automatisierungsgrad der Algorithmen weiter zu steigern. Die erforderliche Rechenleistung sowie Anzahl möglicher Montagereihenfolgen steigt exponentiell mit der Teileanzahl. Selbst heute ist es für klassische Planungsalgorithmen nicht möglich, in wirtschaftlich vernünftiger Zeit sämtliche optimalen Montagereihenfolgen eines üblichen industriellen Produktes zu errechnen. KAVRAKI et al. haben nachgewiesen, dass Probleme der Montagereihenfolgeplanung selbst im zweidimensionalen Fall als NP-Hard zu klassifizieren sind (vgl. Mosemann und Wahl 2001). Für NP-Hard klassifizierte Probleme sind keine effizienten Lösungsalgorithmen bekannt. Seit den Neunzigerjahren konzentriert sich ein Großteil der Forschungsansätze daher auf nicht-traditionelle Optimierungsmethoden, wie Genetische Algorithmen (GA), Simulated Annealing (SA), Tabu Search, Ants Colony oder Neural Networks (vgl. Hu et al. 2011).

Fallbasiertes Schließen (FBS) in der Montageplanung: Fallbasiertes Schließen (FBS), in der englischen Literatur auch als Case Based Reasoning (CBR) bezeichnet, beschreibt einen Ansatz der künstlichen Intelligenz zum analogiebasierten Lernen und Lösen von Problemen (vgl. Biswas et al. 2014). Obwohl FBS im Gegensatz zu anderen Methoden der künstlichen Intelligenz in der öffentlichen Wahrnehmung kaum Beachtung findet, stellt es laut CHEN und BURRELL einen bedeutenden Zweig der künstlichen Intelligenz dar und hat im Bereich der Forschung immer mehr Beachtung

gefunden (vgl. Chen und Burrell 2001). Ein zentrales Element stellt dabei eine als Fallbasis bezeichnete Sammlung von zuvor gemachten und gespeicherten Erfahrungswerten – auch Fälle genannt – dar: Beim FBS werden neue Probleme durch die Wiederverwendung von Erfahrungen aus den Fällen der Fallbasis gelöst, indem zunächst bereits bekannte, ähnliche Fälle ausgewählt werden, die dabei gefundene Lösung für das aktuelle Problem angepasst wird und die gewonnenen Erfahrungen der neuen Lösung wiederum in die Fallbasis als neuer Fall zurückgeführt und gespeichert wird (vgl. Bergmann et al. 2009). Somit entsteht ein künstliches Lernverhalten, welches bei Verwendung einer effizienten Anpassungsstrategie mit jedem weiteren gelösten Fall immer effizienter wird (vgl. Chen und Burrell 2001).

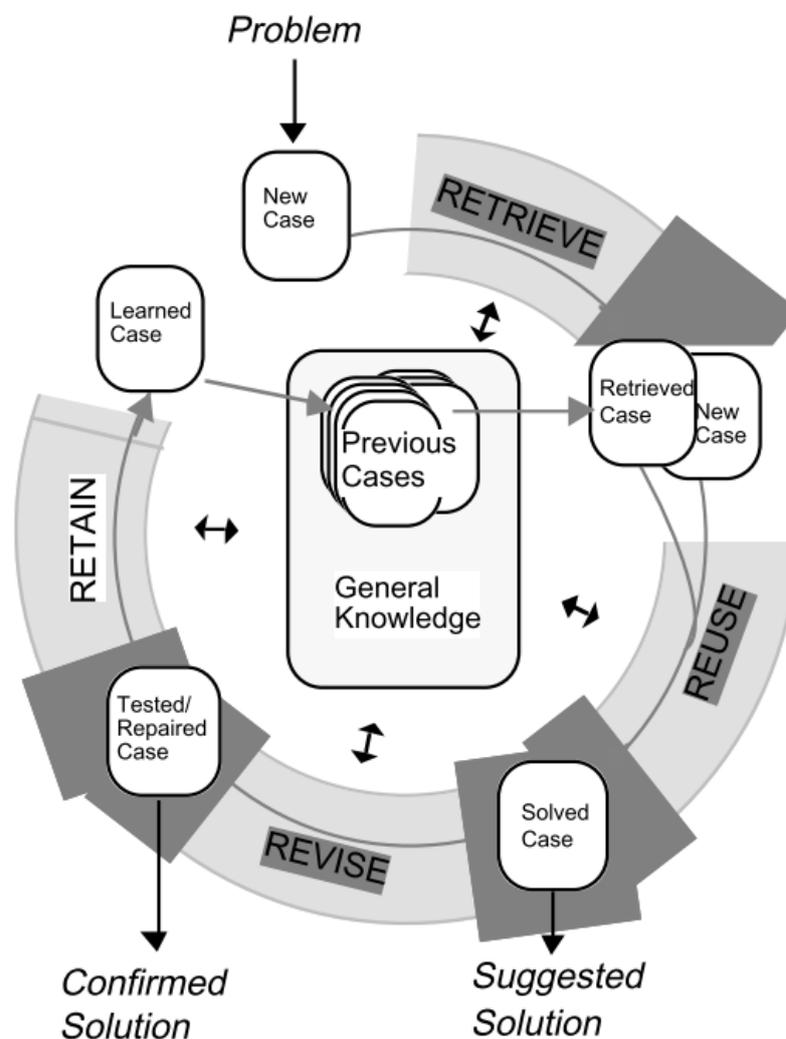


Abbildung 9: Zyklischer Prozess des fallbasierten Schließens (Grafik direkt übernommen aus (Aamodt und Plaza 1994))

Die Grundprinzipien des beschriebenen künstlichen Lernverhaltens stammen dabei aus den Kognitionswissenschaften und wurden vom menschlichen Lernen abgeleitet. AAMODT und PLAZA leiteten daraus einen in Abbildung 9 dargestellten zyklischen Prozess mit vier Phasen ab, welcher zur Lösung geeigneter Probleme mittels FBS herangezogen wird, (vgl. Bach et al. 2014) (vgl. Aamodt und Plaza 1994):

1. Retrieve (dt. Abrufen): Zunächst werden in der Abruf-Phase (Retrieve) ein oder mehrere Fälle aus der Fallbasis ausgewählt, welche eine Ähnlichkeit mit dem neu zu lösenden Problemfall aufweisen. Zur Bewertung der modellierten Ähnlichkeit werden Ähnlichkeitsfunktionen herangezogen. Dazu muss im Vorhinein das Problem verstanden werden und Vergleichs-Merkmale identifiziert werden. Mit wachsender Fallbasis sinkt die Effizienz der ersten Phase, da eine immer größere Anzahl an Fällen hinsichtlich der Ähnlichkeit zum vorliegenden Problemfall bewertet wird (vgl. Bergmann et al. 2009).
2. Reuse (dt. Wiederverwenden): In der zweiten Phase (Reuse) werden die Unterschiede zwischen dem ausgewählten früheren Fall und dem derzeitigen Problemfall analysiert und untersucht, welche Teile des früheren Falls auf den neuen Problemfall übertragbar sind. In Abhängigkeit der analysierten Unterschiede wird entweder a) die Lösung des früheren Falls direkt auf den neuen Problemfall übernommen (Copy, triviale Lösung) oder b) die Lösung des früheren Falls hat einen Anpassungsprozess zu durchlaufen, um kritische Unterschiede zu berücksichtigen (Adapt) (vgl. Aamodt und Plaza 1994).
3. Revise (dt. Überarbeiten): In der Überarbeitungs-Phase (Revise) erfolgt a) eine Bewertung der in der zweiten Phase generierten Falllösung und b) optional ein Reparieren der Falllösung unter Anwendung domänenspezifischen Wissens: Zur Bewertung der generierten Falllösung (Evaluate Solution) wird diese in einer realen oder simulierten Umgebung angewendet und hinsichtlich ihrer Auswirkungen untersucht. Alternativ wird ein menschlicher Akteur (Teacher) zur manuellen Bewertung herangezogen. Da die Bewertungsphase Feedback von außerhalb der Grenzen des FBS-Systems erfordert, nimmt diese Phase eine höhere Verarbeitungszeit in Anspruch. Sofern die Bewertung ergibt, dass die generierte Falllösung Fehler aufweist, sind Ursachen dieser Fehler zu analysieren, um die Lösung manuell zu modifizieren oder weitere auftretende Fehler automatisiert vorzubeugen (Repair Fault) (vgl. Aamodt und Plaza 1994).
4. Retain (dt. Behalten): Die vierte Phase (Retain) ist die eigentliche Lernphase des FBS-Systems und ist durch das Hinzufügen einer generierten Falllösung zur Fallbasis gekennzeichnet. Dies führt dazu, dass die Erfahrung des neu gelösten Problems zur Wiederverwendung bei zukünftigen Problemstellungen herangezogen werden kann (vgl. Bergmann et al. 2009). Dabei werden

zunächst die Problembeschreibung, die Problemlösung und die Problemlösungsmethode als Lerngrundlage für eine zukünftige Wiederverwendung extrahiert (Extract). Anschließend erfolgt eine Indexierung der extrahierten Informationen, sodass diese bei zukünftigen Anwendungen des FBS-Systems effizient aufgefunden werden (Index). Im letzten Schritt erfolgt die eigentliche Speicherung (Integrate) des neu generierten Lösungsfalls in der Fallbasis (vgl. Aamodt und Plaza 1994).

Entscheidend für die Effektivität sowie Effizienz eines FBS-Problemlösers ist die richtige Modellierung des Ähnlichkeitsmaßes, welches zum Vergleichen zweier Fälle herangezogen wird und als Teil des Wissenserwerbsprozesses bereits während der Anwendungsentwicklung zu erarbeiten ist. BERGMANN et al. beschreiben dazu das weit verbreitete Lokal-Global-Prinzip von RICHTER. Dabei werden einzelne lokale Ähnlichkeiten isoliert ausgewertet und anschließend durch Gewichtung in ein globales Ähnlichkeitsmaß überführt (vgl. Bergmann et al. 2009). Das beschriebene maschinelle Lernfahren *Fallbasiertes Schließen* wird ebenso für die Montagereihenfolgenplanung angewandt. Dabei steht insbesondere die automatische Ableitung der Montagereihenfolge durch Wiederverwendung von Montagereihenfolgen aus früheren, ähnlichen Produktvarianten im Fokus. MOUSSA und ELMARAGHY beschreiben die automatische Generierung von „Assembly Networks“ und nachfolgender Ableitung von Montagereihenfolgen auf Grund zuvor durchgeplanter ähnlicher Produktvarianten. Die Autoren verweisen auf das hohe Potenzial zur Einsparung von Planungszeiten und -kosten (vgl. Moussa und ElMaraghy 2018). HEROLD und MINOR führen den Begriff des *prozessorientierten fallbasierten Schließens* ein und beschreiben dabei die Erstellung und Anpassung von Workflows für eine neue Produktvariante unter Nutzung von Erfahrungswissen aus früheren Aktivitäten der Modellierung, Ausführung und Überwachung von Workflows (vgl. Herold und Minor 2018). LEU et al. beschreiben den von AZAB et al. eingeführten Prozessplanungsansatz „Reconfigurable Process Planning (RPP)“ zur Rekonfiguration existierender Prozesspläne. Dabei werden Master-Prozesspläne existierender Bauteile beziehungsweise Produkte automatisch so verändert, dass diese die Anforderungen neuer Bauteile beziehungsweise Produkte erfüllen und die Änderungen am Shop Floor möglichst gering gehalten werden. Anstatt Prozesspläne von Grund auf neu zu erstellen, werden nur neue Teile des alten Prozessplans, die den hinzugefügten oder entfernten Merkmalen beziehungsweise Vorgängen entsprechen, generiert und in den bestehenden Prozessplan eingefügt (vgl. Leu et al. 2013). MOUSSA und ELMARAGHY beschreiben einen von SHIH vorgeschlagenen Ansatz zur Messung der Produktähnlichkeit, um Produktstrukturen beziehungsweise

Stücklisten verschiedener Produktvarianten abzugleichen. Die dabei entstehenden Daten werden zur Ableitung der Montagereihenfolge der neuen Variante verwendet. Die Autoren betonen dabei den Nachteil der Methode, dass eine neue Variante eine Kombination von Teilen haben kann, die in mehr als einer alten Variante vorhanden ist (vgl. Moussa und ElMaraghy 2019). DESHMUKH et al. setzen bereits im Produktdesign auf die Methodik des fallbasierten Schließens und ziehen zur Messung der Produktähnlichkeit die Kriterien Produktgröße, Anzahl der Teile, Anzahl und Arten von Gelenkverbindungen, Anzahl der Verwendungen in anderen Baugruppen, Merkmale der Gesamtform, Namen der Konformitätsnormen sowie den Namen des Konstrukteurs heran (vgl. Deshmukh et al. 2008). Neben der automatischen Ableitung von Prozessplänen für die Montage, wird darauf verwiesen, dass das existierende Wissen ähnlicher Produktvarianten ebenso zur Ermittlung von Kosten (Cost), Zuverlässigkeit (Reliability) und Fehlerberichte (Failure Reports) nutzbar ist (vgl. Deshmukh et al. 2008).

Automatische Erstellung von Text- und Bildinformationen: Um die Arbeitsvorbereitung zu entlasten, werden in der Literatur verschiedene Möglichkeiten beschrieben, textuelle Arbeitsanweisungen, Bilder, Videos / Animationen sowie virtuelle 3D-Objekte automatisch zu erzeugen. KARDOS et al. weisen auf das hohe Potenzial bei der automatisierten Generierung von textuellen Arbeitsanweisungen hin und präsentieren einen Ansatz mittels Nutzung definierter Textbausteine. Dabei weisen die generierten Texte je nach Erfahrung des Montagemitarbeiters eine unterschiedliche Informationstiefe auf (vgl. Kardos et al. 2018). Einen ähnlichen Ansatz demonstrieren MADER und URBAN bei der Erstellung von Texten sowie Bildern für eine visuelle Werkerführung mittels Augmented Reality. Die Autoren weisen weiters darauf hin, dass durch Hinweise auf die Geometrie von Baugruppen, Teilen, Werkzeugen und ähnlichen geometrischen Merkmalen, formalisierte Anweisungen aus einer einzigen Datenquelle, beispielsweise einem 3D-CAD-Modell des zu montierenden Produkts, erschlossen werden (vgl. Mader und Urban 2010). OU und XU beschreiben einen Ansatz zur Ableitung von Montagereihenfolgen, ausgehend von 3D-CAD-Modellen und einer damit einhergehenden schrittweisen Beschreibung mittels Bilder im TIFF (Tagged Image Format), JPEG (Joint Photographic Experts Group) oder PNG (Portable Network Graphics) Dateiformat (vgl. Ou und Xun 2013). Alle bislang vorgestellten Ansätze beschreiben eine Generierung von statischen Werkerinformationen (Texten, Bildern). Auch zur Erstellung von dynamischen Werkerinformationen (Videos, Animationen, 3D-Darstellungen) gibt es relevante Veröffentlichungen: SALONEN et al. beschreiben ihre Software AugAssAnim, welche ausgehend von 3D-CAD-Modellen des Produkts, Montageanweisungen und optional

3D-CAD-Modellen der Werkzeuge, automatisiert Animationen erstellt. Diese Animationen werden durch ein Eingabefenster von den Anwendern parametrisiert (Position, Rotation, Skalierung) und anschließend automatisch erstellt, (vgl. Salonen et al. 2009). FISCHER et al. erwähnen die Möglichkeit, Utility-Filme für die Anleitung von Montageprozessen zu nutzen. Sie verweisen gleichzeitig auf den hohen manuellen Aufwand einer Videoaufnahme von einem physischen Objekt hin und geben an, Videos ausgehend von virtuellen Prototypen zu erstellen. Auf eine detaillierte Beschreibung der Methode wird dabei nicht eingegangen (vgl. Fischer et al. 2015). KARDOS und VANCZA beschreiben in einem Beitrag einen auf Kollisionsanalyse basierenden Algorithmus zur automatisierten Ableitung der korrekten Fügepfade einzelner Bauteile. Diese Informationen sind essentiell für die Erstellung von für den Menschen hilfreichen Videosequenzen (vgl. Kardos und Váncza 2018a). SCHWARTZ et al. beschreiben eine Funktion zur automatischen Ableitung von 3D-Animationen, Textinstruktionen sowie Daten für interaktive Simulationen durch die eigens entwickelte Software Virtual Author. Die generierten Daten werden für Multimedia Trainings-Anleitungen aufbereitet und erfordern nach Angaben der Autoren nur geringe Eingabedaten (vgl. Schwartz et al. 2007). KAIPA et al. stellen ein Anweisungsgenerierungssystem für komplexe, von Menschen ausgeführte Montageoperationen vor. Als Grundlage dienen entsprechend aufbereitete Montagereihenfolgen, welche die Ausgabe von multimodalen Anweisungen ermöglicht, darunter Texte, Grafiken und 3D Animationen. Die generierten Anweisungstexte bestehen aus einzelnen Verben wie beispielsweise Prüfen, Aufnehmen oder Positionieren (vgl. Kaipa et al. 2012).

Schnittstellen visueller Werkerführungssysteme: Werkerführungssysteme werden nur selten als isoliertes System betrieben, sondern weisen Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Hard- und Software-Modulen auf. Darunter fallen Informationssysteme (zum Beispiel ERP, MES, PLM), Steuerungen, Ein- und Ausgabegeräte am Shop Floor sowie Montageplanungs- und Authoring-Software zur Erstellung der Werkerinformationen. Dabei ist besonders auf einen effizienten und durchgängigen Informationsfluss zu achten, sodass eine hohe Datenqualität sichergestellt wird (vgl. Fischer et al. 2014). Um die Interoperabilität von Fertigungssystemen im Allgemeinen zu verbessern, werden bereits viele Standardisierungsbemühungen unternommen – meistens führt eine Systemintegration aber zu speziell entwickelten proprietären Schnittstellen. HEILALA et al. gehen davon aus, dass die Verwendung standardisierter und strukturierter Produktionsdaten in einem neutralen Datenformat wie beispielsweise XML (Extensible Markup Language), die Interoperabilität zwischen einzelnen Informationssystemen deutlich erhöht (vgl.

Heilala et al. 2008). Um cyberphysische Produktionssysteme darzustellen, wurde AutomationML als Beschreibungsmethodik entwickelt und in der IEC 62714 standardisiert (vgl. Danny et al. 2017). AutomationML ist ein XML-basiertes, neutrales und objektorientiertes Datenaustauschformat um interdisziplinäre Planungsdaten – wie beispielsweise geometrische, kinematische, logische oder strukturelle Informationen – zu speichern (vgl. Müller et al. 2019). Es dient vorwiegend zur initialen Modellierung und Engineering cyberphysischer Montagesysteme, jedoch nicht dem Informationsfluss von Montageprozessen- beziehungsweise Montagearbeitsinhalten (vgl. Danny et al. 2017). Im Engineering-Prozess ermöglicht AutomationML einen einheitlichen und objektorientierten Datenaustausch von technischen Informationen und bietet damit eine systemweite Portabilität und geringe Aufwände auf Grund minimaler Konvertierungsvorgänge (vgl. Schäffer et al. 2019). CLAEYS et al. beschreiben ein generisches Datenmodell für Montageprozesse, welches auf ISA-95 Standardmodellen basiert. ISA-95 ist ein internationaler Standard zur Beschreibung und Optimierung von Schnittstellen zwischen Unternehmens- und Steuerungssystemen. Sie fordern von zukünftigen Standards die Abbildung typischer Montageinformationen, beispielsweise Prozesse, Werkeranweisungen, Ressourcen, Sicherheitsvorkehrungen, sowie Formate, beispielsweise Text, Bild, Video oder Audio (vgl. Claeys et al. 2016). KOVACS et al. beschreiben ein vom Fraunhofer IPK entwickeltes Datenmodell zur Modellierung von Instandhaltungsprozessen innerhalb eines digitalen Assistenzsystems. Als Basis dient die in den Neunzigerjahren entwickelte Methode des „Integrated Enterprise Modeling (IEM)“, welche mit DIN EN ISO 19440 kompatibel ist. Die darin gespeicherten Elemente sowie Beziehungen werden zur Verbindung von Ressourcen, Erstellung von kontextsensitiven Werkeranweisungen sowie zur Initialisierung von Unterstützungsfunktionen im Instandhaltungsprozess genutzt (vgl. Kovacs et al. 2019). GUPTA beschreibt 2012 in einem technischen Report den Einsatz eines XML-basierten Datenformats zur Speicherung der Montagereihenfolge. Diese dient als Input für ein Werkeranweisungs-Generierungssystem zur Erstellung von Texten, Bildern und Animationen. Die erstellten Texte werden aus Verben wie beispielsweise Position, Rotate oder Check zusammengesetzt (vgl. Gupta 2012). Um eine automatisierte und aufwandsarme Schnittstelle zwischen Planung und Werkerführungssystem zu ermöglichen, nutzen FISCHER et al. eine proprietäre Struktur im XML-Format. Dabei werden Informationen wie Werkzeuge oder anzuwendende Drehmomente exportiert. Die Autoren weisen auf eine zukünftige Erweiterungsoption zur Integration weiterer Datensätze hin. Das beschriebene Werkerführungssystem extrahiert relevante Datensätze, sodass ein Ausgabesystem mit richtigen Daten zur richtigen Zeit versorgt wird (vgl. Fischer et al. 2014). MÜLLER et al. beschreiben die Anwendung eines Datenformats zur

wechselseitigen Übertragung von Daten eines cyberphysischen Montagesystems zwischen realer und virtueller Produktionsumgebung. Die Autoren beschreiben dabei drei Systeme, welche eine gleiche Datensemantik nutzen und im Austausch stehen: Virtuelle Planungsumgebung zum Vergleich von Produkthanforderungen und Fähigkeiten der Module, ein agentenbasiertes Steuerungssystem zum Datentransfer zwischen verschiedenen Modulen einer Montagelinie sowie ein Messsystem zur Identifizierung der Montagesystemkonfiguration (vgl. Müller et al. 2016a). Das von MÜLLER et al. dargelegte agentenbasierte Steuerungssystem zum Datentransfer zwischen verschiedenen Modulen weist Ähnlichkeiten zu den in der CNC-Fertigungstechnik verwendeten Postprozessoren auf. Ein Postprozessor ist hierbei ein maschinenspezifisches Übersetzungsmodul, welches generische Planungsdaten von Computer-Aided Manufacturing (CAM) Systemen in Steueranweisungen für Maschinen und Anlagen überführt (vgl. Kurbel 1991). Im Kontext der Werkerführungssysteme beschreiben KARDOS und VANCZA den Begriff Postprocessing mit der Generierung von Roboterprogrammen, Manipulatorsteuerungen sowie Werkerinformationen (vgl. Kardos und Váncza 2018b).

### 2.3.3 Produktbeschreibende Daten im Informationsversorgungsprozess

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen Ansatz zur automatisierten Ableitung von Anleitungsinformationen basierend auf produktbeschreibendem Wissen. Produktbezogenes Wissen wird aus einer Reihe von datenbezogenen Produktdefinitionsdarstellungen (unter anderem 3D-CAD-Modelle) abgeleitet und enthält Informationen zu Geometrien und Strukturen des Produkts, Eigenschaften von Bauteilen und Baugruppen sowie zusätzliche variantenspezifische Angaben wie Farben oder Werkstoffe (vgl. Cho et al. 2016). Ein Produktmodell enthält darüber hinaus Informationen über Kontaktbeziehungen, Freiheitsgrade und Verbindungsmerkmale. Dieses in Datenform dokumentierte Wissen stellt eine wesentliche Grundlage für die Montageplanung dar (vgl. Mathew und Rao 2010). Nach GORSKI kann produkt- und prozessbezogenes Wissen in folgenden Formen vorliegen beziehungsweise gespeichert werden (vgl. Górski 2017):

- Text: Bauteilbeschriftungen, Definitionen, Beschreibungen, numerische Daten
- 2D-Grafiken: Zeichnungen, Fotografien, Diagramme, Illustrationen
- 3D-Modelle: CAD-Modelle und künstlich erzeugte Modelle
- Audio: Produktaufnahmen, Betriebsgeräusche, Meldungen
- Animationen: Veränderung der Position von Produktbestandteilen im Zeitverlauf

Produktstrukturen werden in PDM-, PLM- oder ERP-Datenbanken gespeichert und bilden hierarchische Beziehungen zwischen einzelnen Datenobjekten ab, zum Beispiel

zwischen Baugruppen und Bauteile. Dabei kann es in der Praxis zum Entstehen von Parallelstrukturen kommen, da eine in der Konstruktion entworfene Engineering-Struktur nicht ohne Anpassungen der Produktionsausführung oder anderen Lebenszyklusphasen dient (vgl. Leino 2015). STIEF et al. identifizierten verschiedene Ansätze zur Modellierung einer Baugruppe beziehungsweise eines Produkts im industriellen Kontext, darunter Teilleisten, Stücklisten (engl. Bill of Material, BOM) und Liaison-Graphen (vgl. Stief et al. 2018). Diese werden nachfolgend im Detail dargestellt:

Teilleisten werden als eine sehr einfache Möglichkeit der Modellierung bezeichnet und stellen lediglich die verschiedenen Komponenten einer Baugruppe in Listenform dar (vgl. Stief et al. 2018). Die in der Industrie weit verbreitete Stückliste wird als eine segmentierte, hierarchische Liste beschrieben, welche zusätzlich Unterbaugruppen und deren Komponenten beschreibt (vgl. Stief et al. 2018). Stücklisten werden in der industriellen Praxis auch umgangssprachlich als BOM (Bill of Material) bezeichnet und gelten als eine der wichtigsten Vertreter technischer Dokumente. Sie werden weiter unterschieden in EBOM (Engineering Bill of Material) und MBOM (Manufacturing Bill of Material). Eine EBOM stellt die Struktur des Produkts aus funktionaler Sicht dar und ist beispielsweise ein Ergebnis eines Konstruktionsprozesses (vgl. Ebrahimi A.H., Åkesson K., Johansson P.E.C., Lezama T. 2016). Im Gegensatz zur EBOM weist eine MBOM eine auf den Produktions- beziehungsweise Montageprozess abgestimmte Produktstruktur auf, welche manuell oder automatisch erstellt wird (vgl. Leino 2015). Während beispielsweise in einer EBOM von der Konstruktionsabteilung ein Motorblock und vier Befestigungsschrauben als eine Baugruppe definiert werden, wird diese Struktur bei der Überführung zu einer MBOM aufgelöst, sodass der Motorblock eine eigene Baugruppe darstellt und auf gleicher Ebene zusätzlich die vier Befestigungsschrauben als separate Verbindungsbauteile definiert werden. Eine automatische Ableitung einer MBOM auf Grundlage einer EBOM ist automatisch nach definierten Regeln möglich. Wie zuvor beschrieben, können dabei Parallelstrukturen entstehen und EBOM und MBOM sind miteinander abzustimmen. Dadurch wird es möglich, konstruktionsbedingte Änderungen in der EBOM automatisch in die daraus abgeleitete MBOM zu übernehmen (vgl. Ríos et al. 2017) (vgl. Sahu und Chowadary 2022).

Liaison-Graphen sind einfache, ungerichtete Graphen, welche Produktkomponenten graphisch als Knoten darstellen und Verbindungen zwischen einzelnen Produktkomponenten als Kanten (vgl. Mathew und Rao 2010). Liaison-Graphen enthaltenen Informationen über die Verbindungszustände der einzelnen Produktkomponenten und werden somit zur Ableitung von Montagereihenfolgen herangezogen (vgl. Leu et al.

2013). Um eine automatisierte, computerunterstützte Ableitung von Montagereihenfolgen zu ermöglichen, werden Liaison-Graphen auch als Liaison-Matrizen dargestellt. Eine Liaison-Matrix ist eine symmetrische Matrix, welche unter Verwendung von Binärcodes („0“ oder „1“) erstellt wird, wobei „1“ einen Oberflächenkontakt zwischen den in Zeile und Spalte angegebenen Teilepaaren darstellt, während „0“ keinen Oberflächenkontakt darstellt (vgl. Bahubalendruni und Biswal 2018).

### 2.3.4 Zusammenfassung und Fazit

Der Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme umfasst Erstellung sowie Eintragung von Werkerinformationen und ist manuell, automatisiert oder semi-automatisiert gestaltet. Die Nutzung systemspezifischer Editoren ist die derzeit übliche Methode zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme, zeichnet sich jedoch durch einen geringen Unterstützungsgrad und damit einhergehenden hohen zeitlichen Aufwänden aus, da Montageplanung, Inhaltserstellung sowie Inhaltseintragung manuell durchgeführt werden. Authoring-Tools mit hohem Unterstützungsgrad erfahren eine zunehmende Verbreitung in der industriellen Praxis, da diese eine Anwenderin beziehungsweise Anwender eine intuitive Benutzeroberfläche sowie diverse Automatismen zur Erstellung von Arbeitsanleitungen bieten. Dennoch bleiben die Vorgabe der Montagereihenfolge sowie die Eingabe von Parametern notwendige Schritte, welche von einem Menschen ausgeführt werden und insbesondere bei kleinen Losgrößen zu hohen Arbeitsaufwänden führen. „Programming by Demonstration“ gilt als ein vielversprechender Ansatz für eine einfache und intuitive Erstellung von Inhalten für visuelle Werkerführungssysteme und wird von verschiedenen akademischen Instituten erforscht und laufend weiterentwickelt. Der Ansatz erscheint allerdings nicht geeignet für kleinste Losgrößen (Losgröße 1), da in diesem Fall der Demonstrationsprozess durch einen Prozessexperten bereits die eigentliche wertschöpfende Tätigkeit darstellt und so wertvolle Mitarbeiterkapazitäten gebunden werden. Eine automatische Generierung von Montagesequenzen bietet ein großes Potenzial für die Entlastung der Arbeitsvorbereitung und basiert auf einer automatischen Extraktion benötigter geometrischer Informationen der Produkte aus im Unternehmen vorliegenden 3D-CAD-Modellen. Durch den Einsatz von fallbasiertem Schließen wird eine automatische Ableitung von Montagereihenfolgen, Kosten und potenziellen Fehlerquellen möglich: Wissen über ähnliche Produktvarianten wird dabei verwendet und auf neue Planungsfälle angepasst. Die Ansätze unterscheiden sich jeweils in den Algorithmen zur Messung der Ähnlichkeit zwischen Produktvarianten beziehungsweise Bauteilen sowie der Methodik zur automatischen Generierung der Montagereihenfolgen neuer

Produktvarianten. Durch eine automatische Generierung von statischen, als auch dynamischen Werkerinformationen wie beispielsweise Texten, Bildern oder Videos werden Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung stark entlastet und sind damit in der Lage, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren, wie beispielsweise Planung der Montagereihenfolge, Angabe von Parametern für Peripheriesysteme oder Optimierung von Prozessen. Der Stand der Forschung weist hier einen hohen Reifegrad auf, wobei sich die Ansätze im Wesentlichen von der Qualität der generierten Informationen sowie den dafür benötigten Eingabe-Informationen unterscheiden. Da visuelle Werkerführungssysteme ihr volles Unterstützungspotenzial erst bei einer erfolgreichen Integration mit umliegenden Systemkomponenten entfalten, ist es erforderlich, dass diese mittels standardisierter Schnittstellen und montagespezifischen Datenformaten mit umliegenden Hard- und Softwaresysteme kommunizieren. Die Mehrheit der beschriebenen Ansätze aus Forschung und Industrie verwenden jeweils eigens definierte Datenformate zur Gewährleistung des Informationsflusses von Montageprozessen- beziehungsweise Montagearbeitsinhalten. Ansätze wie AutomationML werden hingegen vorzugsweise zur initialen Modellierung und Engineering cyberphysischer Montagesysteme herangezogen. Produktbeschreibendes Wissen wird aus einer Reihe von datenbezogenen Produktdefinitionsdarstellungen (unter anderem CAD-Modelle) abgeleitet und enthält unter anderem Geometrien, Strukturen, Werkstoffe, Informationen über Kontaktbeziehungen, Freiheitsgrade und Verbindungsmerkmale. Dabei sind insbesondere Stücklisten (BOM) und 3D-CAD-Modelle weit verbreitete Informationsträger und damit eine wichtige Grundlage für eine automatisierte Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme.

Zusammengefasst werden in der Literatur aktuell folgende Probleme im Arbeitsvorbereitungsprozess visueller Werkerführungssysteme beschrieben:

- Hohe zeitliche Aufwände je Produktvariante und damit einhergehende hohe Personalkosten in der Arbeitsvorbereitung (vgl. Gupta 2012) (vgl. Feldmann und Lang 2007)
- Ein erforderlicher hoher Stützleistungsanteil bei kleinen Losgrößen führt zu einem verminderten Wertschöpfungsanteil (vgl. Lušić 2017)
- Prozessexperten der Arbeitsvorbereitung werden für die Erstellung von Werkeranweisungen benötigt, anstatt die Optimierung der wertschöpfenden Prozesse zu treiben (vgl. Aehnelt und Bader 2016)
- Kein durchgängiges Informationssystem sowie eine hohe Anzahl an Medienbrüchen, wie beispielsweise grafische Benutzeroberflächen zur Eingabe von zuvor erstellten Werkerinformationen (vgl. Heilala et al. 2008)

- Unterschiedliche Qualität der Arbeitsanweisungen auf Grund fehlender Standards (vgl. Feldmann und Lang 2007)
- Eine Vielzahl unterschiedlicher visueller Werkerführungssysteme ist verfügbar, wobei keine standardisierte Eingabe von Informationen möglich ist (vgl. Müller et al. 2018a) (vgl. Bertram et al. 2018)
- Spezialwissen in Programmierung, CAD-Modellierung sowie Konfiguration von einzelnen visuellen Werkerführungssystemen unterschiedlicher Hersteller ist erforderlich (vgl. Wolfartsberger et al. 2017) (vgl. Gattullo et al. 2018)
- In der Vergangenheit erarbeitete Planungsergebnisse, beispielsweise einer ähnlichen Produktvariante, werden nicht wiederverwendet (vgl. Funk et al. 2018)

## 2.4 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Allgemeines Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme, um damit manuelle Aufwände im Informationsversorgungsprozess zu senken. Da das zu entwickelnde Vorgehensmodell nur unter bestimmten Rahmenbedingungen Gültigkeit besitzt, wird nachfolgend eine Eingrenzung des Untersuchungsbereichs beschrieben und jeweils grafisch hervorgehoben.

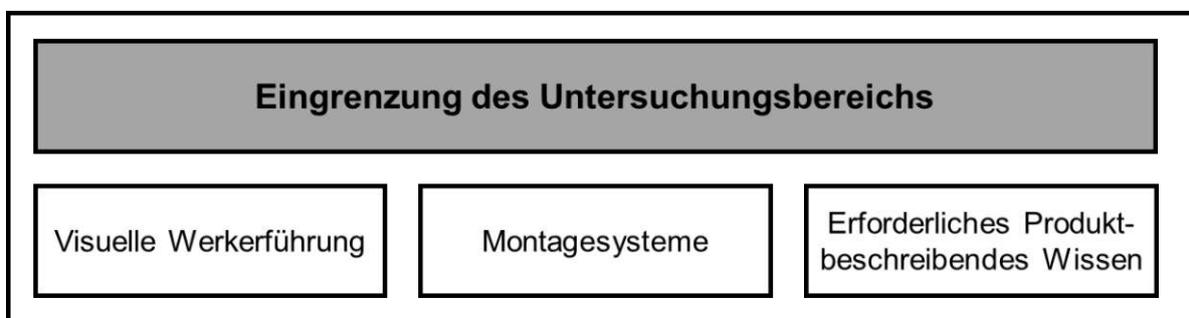


Abbildung 10: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Die vorliegende Arbeit wird entlang folgender Dimensionen eingegrenzt:

- Eingrenzung auf visuelle Werkerführung: Der Untersuchungsbereich beschreibt ausschließlich die Informationsversorgung für den Spezialfall von visuellen Werkerführungssystemen. Diese dienen als Empfänger der zu erzeugenden und einzutragenden Informationen.
- Eingrenzung auf Montagesysteme: Diese Arbeit beschränkt sich ausschließlich auf manuelle Montageprozesse innerhalb eines cyberphysischen Montagesystems und bezieht sich damit auf Tätigkeiten mit geringem Automatisierungsgrad und kleinen Losgrößen je Produktvariante.

- Eingrenzung des erforderlichen, produktbeschreibenden Wissens: Neben Assistenzsystem und Arbeits- beziehungsweise Systemumgebung hat das zu montierende Produkt einen wesentlichen Einfluss auf Inhalt und Darstellungsform von Anleitungen in visuellen Werkerführungssystemen. Um einen automatisierten Informationsversorgungsprozess zu gewährleisten, sind somit 3D-CAD-Modelle sowie Stücklisten der jeweiligen Produktvarianten zwingend erforderlich, da diese die benötigten Informationen für die zu erstellende Anleitung enthalten.

### Eingrenzung auf visuelle Werkerführung:

Um eine wissenschaftlich valide Bearbeitung der Problemstellung zu ermöglichen, wird das breite Themenfeld der Assistenzsysteme in mehreren Schritten auf visuelle Werkerführungssysteme eingegrenzt: Zunächst erfolgt die Eingrenzung von Assistenzsystemen zu industriellen Assistenzsystemen. In einem weiteren Schritt werden lediglich informatorische Assistenzsysteme betrachtet. Werkerführungssysteme stellen dabei eine untergeordnete Art der informatorischen Assistenzsysteme dar. Erst die finale Eingrenzung auf visuelle Werkerführungssysteme ermöglicht eine effiziente und zielgerichtete Bearbeitung der Fragestellung im Zuge dieser Arbeit.

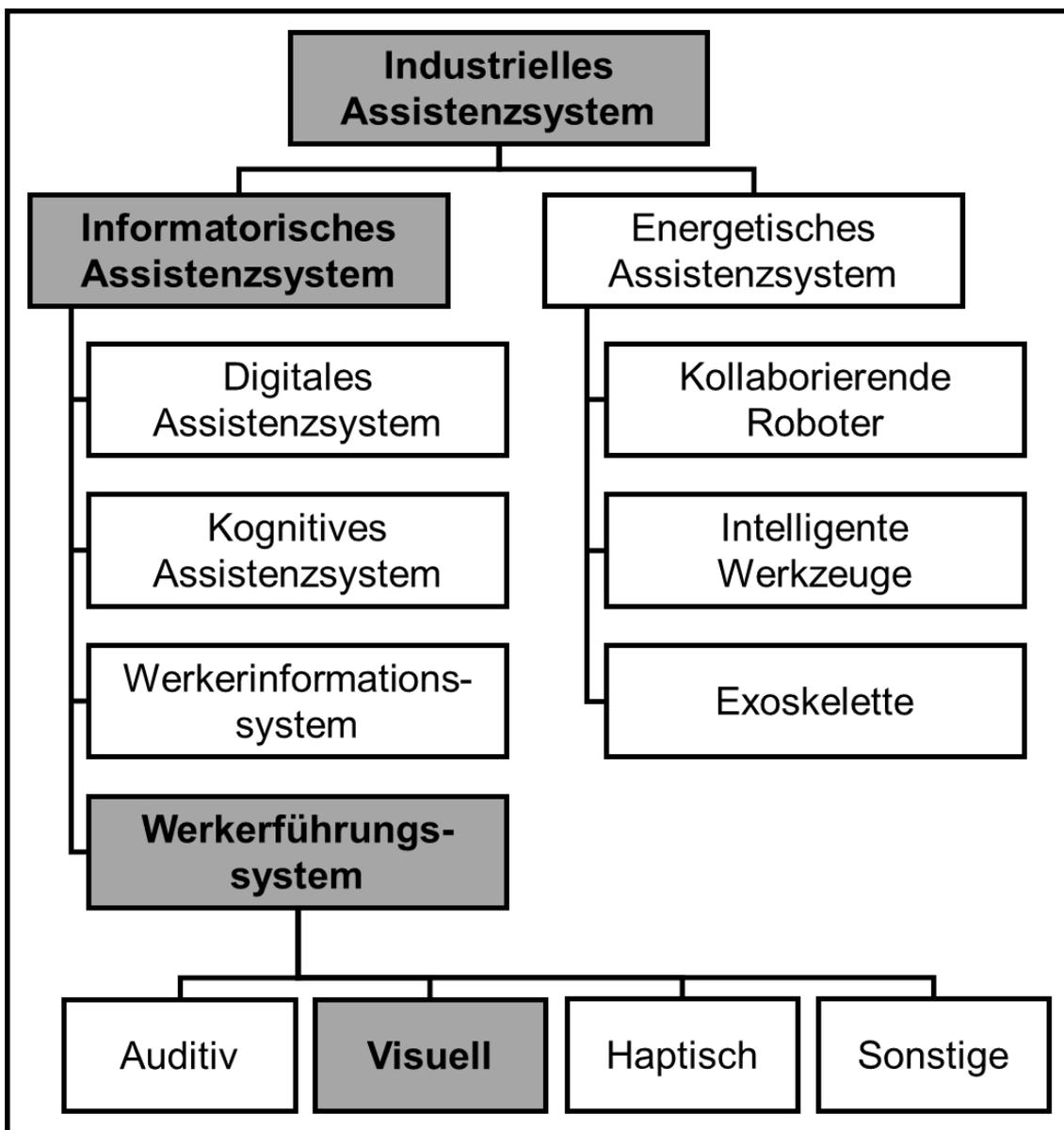


Abbildung 11: Eingrenzung auf visuelle Werkerführung, Einordnung in der Gruppe der industriellen Assistenzsysteme

### Eingrenzung auf Montagesysteme:

Von den vielseitigen Anwendungsfällen innerhalb eines Produktionssystems werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Montagesysteme (MS) betrachtet. Hohe Variantenvielfalt, kleine Losgrößen sowie hohe Produktkomplexität bewirken auf Grund der fehlenden Flexibilität neue Herausforderungen für traditionelle Montagesysteme. Das Konzept der cyberphysischen Montagesysteme zielt darüber hinaus auf ein hohes Maß an Harmonisierung, die Berücksichtigung der Leistung individueller Mitarbeitenden sowie die Reduktion von Verschwendungen an Schnittstellen ab und ermöglicht es damit, komplexe manuelle Prozesse innerhalb eines cyberphysischen Montagesystems zu managen (vgl. Dombrowski et al. 2013b). In Verbindung mit dem nächsten Eingrenzungsschritt auf „menschzentrierter Montagesysteme“ ergibt sich damit ein von ROMERO et al. bezeichnetes Konzept der Human Cyber-Physical Systems (H-CPS), welches unter anderem auf kognitive und physische Bedürfnisse des Mitarbeiters eingeht und mittels verbesserter Technologie (zum Beispiel Datenbrillen) die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zu verbessern versucht (vgl. Romero et al. 2016a) (vgl. Pantano et al. 2020).

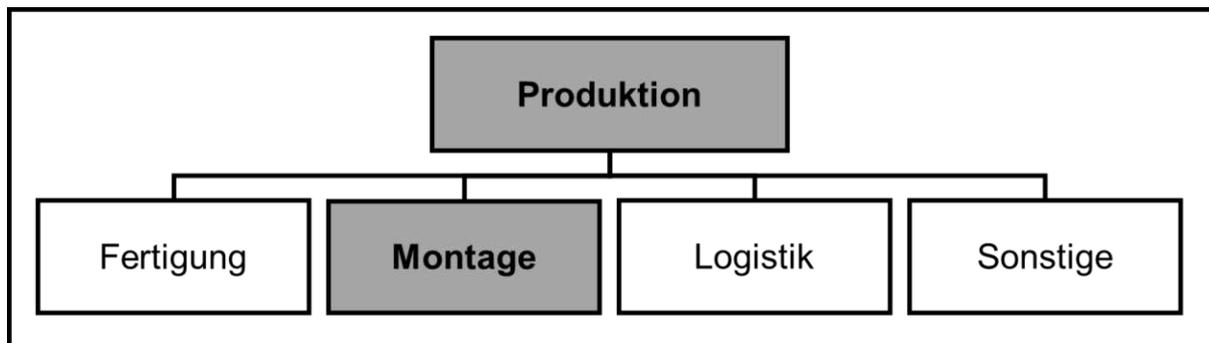
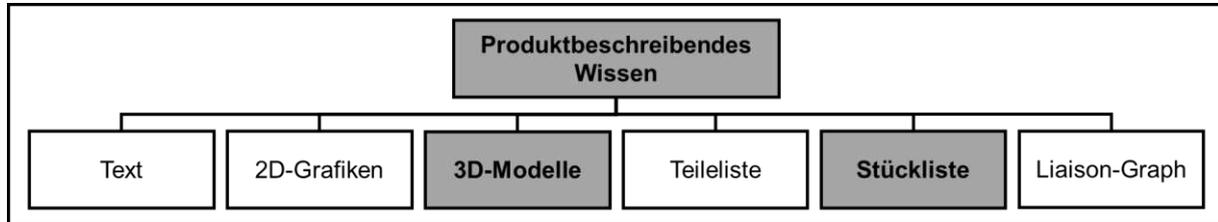


Abbildung 12: Eingrenzung des betrachteten Systemumgebung

### Eingrenzung des erforderlichen, produktbeschreibenden Wissens:

Der Untersuchungsbereich wird ausschließlich auf Anwendungsfälle eingegrenzt, bei welchen ein virtuelles Produktmodell der zu montierenden Produktvariante vorliegt und als 3D-CAD-Modell verfügbar ist. Um die Qualität der Ergebnisse des automatisierten Informationsversorgungsprozesses zu steigern, werden zusätzlich Stücklistendaten als Ergänzung miteinbezogen. Diese beiden Datentypen dienen als notwendige Wissensträger (produktbeschreibendes Wissen) zur Beschreibung des zu produzierenden Produkts und sie werden noch vor Start des Produktionsprozesses von der Konstruktions- oder Entwicklungsabteilung erarbeitet und zur Verfügung gestellt. Das Produktmodell sollte eine geometrische Darstellung von Bauteilen sowie Beziehungen wie Kontakte und Freiheitsgrade der einzelnen Bauteile untereinander

enthalten. Stand der Technik ist hierbei die virtuelle Erstellung von Produktmodellen mittels CAD-Software, wodurch geometrische Informationen als maschinenlesbare Daten vorliegen (vgl. Mathew und Rao 2010).



**Abbildung 13: Eingrenzung des erforderlichen, produktbeschreibenden Wissens**

### 3 Stand der Forschung und Forschungsbedarf

Dieses Kapitel stellt den Stand der Forschung zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme, den Forschungsbedarf sowie die Zielsetzung der Arbeit dar. Dazu werden ganzheitliche Forschungsvorhaben und Entwicklungen beschrieben, welche diese Problemstellung bereits adressieren. Aus den analysierten Arbeiten wird in einem weiteren Schritt der Forschungsbedarf identifiziert, welcher nachfolgend die spezifische Zielsetzung sowie Forschungsfrage dieser Arbeit bestimmt. Der Inhalt des vorliegenden Kapitels legt die Grundlage für die erste Phase „Problem identifizieren, motivieren“ des DSRM-Nominalprozesses und beantwortet die Frage, welches Problem identifiziert wurde beziehungsweise wie hoch die Relevanz des identifizierten Problems ist (vgl. Peffers et al. 2007).

#### 3.1 Stand der Forschung

Nachfolgend wird der Stand der Forschung zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme dargestellt. Dabei werden ganzheitliche Forschungsvorhaben diskutiert, welche die gesamte Informationsversorgung oder zumindest große Teile davon abbilden. In Kapitel 2.4 wurde der Untersuchungsbereich dieser Arbeit auf visuelle Werkerführungssysteme eingegrenzt. Einige der hier angeführten Ansätze sind hingegen nicht darauf beschränkt, sondern beziehen sich auf die umfassendere Gruppe industrieller Assistenzsysteme. Diese betroffenen Literaturverweise wurden kritisch auf ihre Übertragbarkeit auf die in der Gruppe der industriellen Assistenzsysteme inkludierten visuellen Werkerführungssystemen geprüft und sind auf Grund ihrer guten Übertragbarkeit nachfolgend ebenso angeführt.

Als methodische Grundlage für den nachfolgenden Überblick des Stands der Forschung dient eine umfassend durchgeführte Literaturanalyse. Dabei wurden zunächst wissenschaftliche Konferenz-, Zeitschriften- und Buchbeiträge in Online-Datenbanken (zum Beispiel Scopus, Elsevier, Google Scholar) und Bibliotheken (zum Beispiel Universitätsbibliothek der Technischen Universität Wien) mittels Schlagwortsuche ermittelt. Durch Screening von Titel, Schlagwörtern und Kurzfassung wurden im nachgehenden Schritt relevante Beiträge gefiltert. Um auch neu publizierte Beiträge laufend miteinzubeziehen, wurde eine regelmäßige Überprüfung auf kürzlich veröffentlichte Beiträge in sozialen Netzwerken für Forscher (zum Beispiel ResearchGate) durchgeführt. Weiters wurde ein Benachrichtigungs-Service (Push-Service) der Datenbanken Google Scholar, Academia und Mendeley genutzt, um eine regelmäßige Zusammenfassung neuer Beiträge von zuvor ausgewählten Autoren,

Forschungsinstitutionen sowie Schlagworten zu erhalten. Als weitere Maßnahme wurden Literaturverzeichnisse von besonders relevanten Arbeiten analysiert, um weitere Literaturquellen zu identifizieren und somit die Breite der wissenschaftlichen Basis dieser Literaturanalyse zu erhöhen.

Nachfolgend werden ganzheitliche Ansätze und Forschungsvorhaben beschrieben und miteinander verglichen. Dabei stehen Publikationen im Vordergrund, welche eine automatisierte Informationsversorgung von Werkerführungssystemen möglichst ganzheitlich abbilden und somit eine ähnliche Problemstellung wie vorliegende Arbeit haben.

MEDELLING et al. (2010) beschreiben einen Ansatz zur automatischen Generierung von Roboterprogrammen und manuellen Montageanleitungen. Fokus wird dabei auf eine Zerlegung von „Octrees“ zur automatischen Ableitung von Montagereihenfolgen gelegt. Durch ein beschriebenes Übersetzungsmodul ist es möglich, automatisch erstellte Montagereihenfolgen zur Erstellung von Roboterprogrammen sowie Ableitung von textbasierten Montageanleitungen zu nutzen. Die Mitarbeitenden erhalten Informationen, welche Bauteile in welcher Reihenfolge montiert werden und ob Positionierungs- oder Klebeschritte durchzuführen sind. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass Octrees nur eine Näherung des 3D-CAD Produktmodells sind und dieser Ansatz somit nicht bei komplexen Produkten beziehungsweise Montageprozessen anzuwenden ist (vgl. Medellin et al. 2010).

MADER und URBAN (2010) präsentieren einen Ansatz zur Generierung von Inhalten für AR-basierte Anleitungen durch Extraktion von Daten aus bereits vorliegenden technischen Dokumenten mittels einer „Controlled Natural Language“. Dies ermöglicht die Wiederverwendung bereits bestehender Anleitungen, einer Überführung dieser Anleitung in eine formalisierte Darstellung und anschließender automatischer Ableitung von textuellen und graphischen Anweisungselementen. Formalisierte Informationen werden im XML-Format gespeichert und zur Werkerführung mittels AR verwendet. Die Autoren der Publikation verfolgten bereits 2010 einen Wiederverwendungs-Ansatz. Das beschriebene Vorgehen ist jedoch nur dann anwendbar, wenn erforderliche technische Dokumente bereits vorliegen. Weiters ist ein hoher Anpassungsaufwand für hochvariante Produkte zu erwarten (vgl. Mader und Urban 2010).

MAKRIS et al. (2013) kombinieren Methoden des ASP mit einer automatischen Aufbereitung von Montageanleitungen für AR. Als Input dienen 3D-CAD-Daten des Produktmodells, welches zunächst durch eine Trennung von Bauteilen und

Verbindungselementen vereinfacht wird. Durch eine Simulation der möglichen Demontagepfade wird durch Umkehrung der gefundenen Lösung eine Montagereihenfolge abgeleitet, welche von einem Experten geprüft und anschließend als XML Datei kodiert und exportiert wird. Diese dient in Kombination mit 3D Daten des Produktmodells zur automatischen Erzeugung von Augmented Reality Anleitungen. Eine Ausgabe der erzeugten Informationen erfolgt jedoch ausschließlich innerhalb einer von den Autoren entwickelten Ausgabesoftware. Weiters ist der Ansatz auf Augmented Reality beschränkt und erfordert auf Grund des Einsatzes klassischer Methoden des Assembly Sequence Plannings eine hohe Erstellungsdauer (vgl. Makris et al. 2013).

Eine Methode zur durchgehenden Nutzung von Daten zwischen virtueller Montageplanung und physischer Montageausführung wird von MÜLLER et al. (2016) beschrieben. Der Fokus liegt auf der Informationsversorgung von cyberphysischen Systemelementen, während die Instruktionsgenerierung für Werkerführungssysteme nur erwähnt, aber nicht näher ausgeführt wird. Bemerkenswert ist der Ansatz, mittels virtueller Agenten Prozessdaten (zum Beispiel Schraubmomente) aus einer Datenbank zu übersetzen und damit verschiedene Module einer cyberphysischen Montagelinie mit Daten zu versorgen. Die Montageplanung und schrittweise Eingabe von durchzuführenden Montageinhalten wird jedoch nicht näher beschrieben, wodurch eine große Herausforderung der automatisierten Informationsversorgung von Werkerführungssystemen nicht adressiert wird (vgl. Müller et al. 2016a).

LUSIC (2017) beschreibt in seiner Dissertation ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme, welches simultan zum Produktentstehungsprozess verortet ist. Dabei erfolgt der üblicherweise nachgelagerte Erstellungsprozess von Werkerinformationen möglichst parallel zum Produktentwicklungsprozess. Zur Erstellung dynamischer Montagevisualisierungen werden charakteristische Skelettmodelle angewandt, welche für ähnliche Produktvarianten und Montageschritte wiederverwendet werden. Der Ansatz bietet eine Entlastung der Arbeitsvorbereitung und ermöglicht eine Reduktion der Durchlaufzeit; der zeitliche Aufwand wird jedoch bei hochvarianten Produkten nur minimal gesenkt (vgl. Lušić 2017).

KAIPA et al. (2018) präsentieren einen Ansatz, um ausgehend von bereits vorliegenden Montageplänen, Werkeranleitungen in Form von Texten, Bildern und 3D Animationen zu generieren. Die Erstellung von Texten erfolgt durch Mustervorlagen von Teilaufgaben. Bei der Generierung von Bildern und 3D Animationen werden ähnliche Bauteile identifiziert und so dargestellt, dass die Wahrscheinlichkeit einer

irrtümlichen Verwechslung reduziert wird. Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung werden so bei der Erstellung von Werkerinstruktionen entlastet, jedoch nicht bei der Erstellung von Montageplänen beziehungsweise der Eintragung erstellter Instruktionen in visuelle Ausgabesysteme (vgl. Kaipa et al. 2018).

Projektionsbasierte Werkerführung ermöglicht die Führung von Werkern mittels Lichtsignale bei gleichzeitigem Tracking von Werkerschritten durch eine Tiefenbildkamera. FUNK et al. (2018) weisen auf einen hohen zeitlichen Aufwand hin, welcher bei der Arbeitsvorbereitung von projektionsbasierten Werkerführungslösungen anfällt und stellen einen „Programming by Demonstration“ Ansatz vor. Dabei führt ein Experte einen Montageprozess in einzelnen Schritten durch, Tiefenbildkameras erfassen Entnahme- und Verbauort von Bauteilen und generieren so automatisiert Montageanleitung zur nachfolgenden Ausgabe als projektionsbasierte Information an das Montagepersonal. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe dieses Ansatzes zeitliche Aufwände für die Erstellung einer Montageanleitung um 90% gesenkt werden. Als Limitierungen erwähnen die Autoren eine derzeit noch unsichere Erkennung von Prozessschritten. Problematisch ist ebenso der Einsatz dieses Systems bei geringen Losgrößen, da der beschriebene Teach-In-Vorgang in diesem Fall sehr häufig durchgeführt wird und somit die Aufwände für die Arbeitsvorbereitung erneut steigen (vgl. Funk et al. 2018).

KARDOS et al. (2018) präsentieren mehrere Methoden zur Erzeugung kontextabhängiger, animierter Arbeitsanweisungen aus automatisch generierten Montageplänen. Eine feature-basierte Analyse des Produktmodells dient der Generierung realisierbarer Montagereihenfolgen, der Extraktion von einzelnen Montagetätigkeiten für Mitarbeitende sowie der Ableitung von Fügepfaden einzelner Bauteile. Nach automatischer Generierung von Texten mittels Textbausteine und Ableitung animierter 3D Modelle erfolgt eine Nachbearbeitung durch Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist die Abhängigkeit von feature-basierten Produktmodellen sowie hohe Rechenzeiten je Produktvariante, was sich insbesondere bei kleinen Losgrößen negativ auswirkt (vgl. Kardos et al. 2018).

NEB und STRIEG (2018) beschreiben eine Generierung von AR-basierten Montageinstruktionen ausgehend von Produktmerkmalen. Dabei werden verschiedene Methoden des Computer-Aided Assembly Planning (CAAP) zur Ableitung von Montagereihenfolgen herangezogen. Virtuelle statische und dynamische Medien werden automatisch abgeleitet, über eine Editor-Software nachbearbeitet und auf einem Augmented Reality Headset ausgegeben. Der Ansatz ist vielversprechend, ist jedoch mit hohen Verarbeitungszeiten insbesondere bei

komplexen Produktmodellen und geringen Losgrößen benachteiligt (vgl. Neb und Strieg 2018).

LI et al. (2018) zeigen einen Ansatz zur automatischen Generierung von Montageanleitungen durch Authoring in einem AR-orientierten Informationsplanungssystem („AR oriented Information Planning System“, ARIPS) und nachfolgender Ausgabe der erzeugten Informationen mittels eines AR-basierten Montageanleitungssystems („AR based Assembly Instruction System“, ARAIS). Eine ohne Programmierkenntnisse bedienbare Authoring-Software dient der Definition des Montageplans, der Festlegung von Beziehungen zwischen realen und virtuellen Objekten und nachfolgender Erstellung von Werkerinstruktionen durch Hervorheben und Animation von Bauteilen. Der Authoring-Prozess wird jedoch je Produktvariante durchgeführt und entlastet Prozessexperten somit nur bei hohen Losgrößen ausreichend. Weiters ist eine Ausgabe der erstellten Informationen auf das eigens entwickelte Werkerführungssystem ARAIS beschränkt (vgl. Li et al. 2018).

REISINGER et al. (2018) beschreiben ein Konzept zur datengetriebenen Rekonfiguration von digitalen Assistenzsystemen. Dabei dienen 3D-CAD-Modelle sowie Stücklisteninformationen als Eingangsdaten. Durch Nutzung einer eigens entwickelten Authoring-Software wird ein Prozessexperte bei der Erstellung des Montageplans unterstützt. Nachfolgend werden Texte und Bilder automatisiert generiert und über systemspezifische Postprozessoren an verschiedene digitale Assistenzsysteme automatisiert übergeben. Es bleibt jedoch ein hoher Aufwand für den beschriebenen manuellen Authoring-Schritt bei kleinen Losgrößen (vgl. Reisinger et al. 2018).

Eine Fallstudie von CLAEYS et al. (2019) zeigt auf, dass im Erstellungsprozess eine Vielzahl von Authoring-Tools eingesetzt werden und der Datentransfer zwischen Informations-Autoren sowie Informations-Konsumenten limitiert ist. Das vorgestellte Rahmenwerk sieht vor, dass Informationskonsumenten durch Annotationen an den Werkerinstruktionen ihre Expertise einbringen und schrittweise verbessern. Diese Annotationen werden klassifiziert, mit bereits vorhandenen Montageinformationen verknüpft und durch ein intelligentes Authoring- und Management-System an die Informations-Autoren als Feedback zurückgegeben. Erste Tests des Rahmenwerks zeigten eine deutliche Beschleunigung des Informationserstellungsprozesses, wobei nicht näher quantifiziert wird, in welchem Grad diese Beschleunigung realisiert werden konnte. Ein beschriebener Nachteil ist, dass Mitarbeitende ihr Wissen laufend über Annotationen einbringen müssen, um eine automatisierte Erstellung von Werkerinformationen zu ermöglichen (vgl. Claeys et al. 2019).

BLATTGERSTE et al. (2019) präsentieren einen Ansatz zur Erstellung von AR-Werkerinstruktionen durch eine Demonstration des Arbeitsprozesses. Dabei nutzen Mitarbeitende eine Software-Applikation, welche mittels Microsoft HoloLens sowie einem Android Smartphone eine ergonomische Eingabe sowie Bearbeitung von Reihenfolgen, Positionen sowie virtuellen Elementen ermöglicht. Dieser Ansatz verfolgt somit eine ähnliche Vorgehensweise wie von FUNK et al. dargestellt (vgl. Funk et al. 2018), unterscheidet sich jedoch insofern, dass für die Erstellung der Werkerinstruktionen nicht zwingend physische Werkobjekte erforderlich sind. Die Autoren erwähnen, dass der vorgestellte Ansatz eine umfangreiche Bibliothek von 3D Modellen erfordert, welche von Anwenderunternehmen zunächst zur Verfügung zu stellen sind. Eine durchgeführte Evaluierung sowohl von der Erstellung als auch Konsumation der Werkerinformationen zeigte ein positives Benutzer-Feedback. Da der manuelle Erstellungsprozess durch Demonstration jedoch für jede Variation im Arbeitsablauf erneut durchzuführen ist, ist dieser Ansatz nur für geringe Losgrößen beziehungsweise generische Anleitungen zielführend (vgl. Blattgerste et al. 2019).

KARDOS (2020) beschreibt in seiner Dissertation ein umfangreiches und detailliertes Konzept zur automatisierten Erstellung von Werkerinformationen für bildschirmbasierte Werkerführungssysteme. Dieses Konzept teilt den Planungsprozess in Makro- und Mikro-Ebene ein. Auf Makro-Ebene werden mittels eines Bedingungs-Modells die Montagereihenfolge, zu verwendende Werkzeuge sowie Vorrichtungen festgelegt, während die Planung auf Mikro-Ebene auf geometrische Eigenschaften zurückgreift, wie beispielsweise Bewegungspfade von Baugruppen. Im Anschluss erfolgt die eigentliche Erstellung von textuellen sowie grafischen Werkerinformationen sowie eine Übertragung dieser Informationen in ein Werkerführungssystem. Der Autor greift auf Ansätze der automatisierten Montagereihenfolgeplanung (ASP) zurück und erwähnt im Ausblick der Arbeit, dass bei größeren Produktmodellen eine Steigerung der Effizienz erforderlich ist, um dieses Konzept auch in der industriellen Praxis zu nutzen (vgl. Kardos 2020).

Ein von GORS et al. (2020) entwickeltes Software-Werkzeug ermöglicht eine teil-automatisierte Extrahierung von digitalen Werkeranweisungen basierend auf CAD-Modellen. Dabei wird ein 3D-CAD-Modell eines Produkts schrittweise demontiert. Dieses Vorgehen baut auf Ansätzen der Assembly Sequence Planning (ASP) auf, ermöglicht jedoch eine weitaus bessere Effizienz und somit ebenso den Einsatz bei komplexen beziehungsweise sehr umfangreichen Produktmodellen. In einem zweiten Schritt erfolgt eine automatisierte Ableitung von Texten, Bildern, 3D-Modellen und Animationen. Während Texte aus standardisierten Textbausteinen erstellt werden, erfolgt die Erstellung von Bildern bei gleichzeitiger Gewährleistung einer maximalen

Sichtbarkeit der relevanten Bauteile. Die Autoren beschreiben die Problematik, dass 3D-CAD-Modelle in vielen Anwendungsfällen Ungenauigkeiten enthalten und so keine vollständig automatisierte Ableitung der Montagereihenfolge möglich ist und stattdessen ein menschlicher Mitarbeiter in den Planungsprozess einzugreifen hat. Weiters erwähnen die Autoren, dass der entwickelte Demontage-Algorithmus auch Reihenfolgen ausgibt, welche in der Realität nicht oder nur sehr umständlich auszuführen sind (vgl. Gors et al. 2020).

NEB et al. (2021) präsentieren einen Ansatz zur automatischen Generierung von AR-Instruktionen ausgehend von CAD-Modellen. Die Autoren nutzen geometrische sowie prozessbezogene Eigenschaften in CAD-Daten und leiten daraus Montagereihenfolgen sowie Fügepfade einzelner Baugruppen ab. Sie unterscheiden dabei low-level-Features, also beispielsweise formbasierte Eigenschaften der einzelnen Bauteile und high-level-Features, also zum Beispiel Fügeflächen welche aus low-level-Features abgeleitet werden. Dieser Ansatz ermöglicht somit nicht nur eine effiziente Ableitung von Montagereihenfolgen, sondern darüber hinaus auch eine Erstellung von Fügeanimationen. Abgeleitete Daten werden in standardisierten Dateiformaten gespeichert und über eine eigens entwickelte Applikation auf einer AR-basierten Datenbrille visualisiert. Die Autoren erwähnen eine vorliegende Limitierung auf ein spezifisches CAD-System, welche zukünftig aufgelöst wird. Da das präsentierte Konzept auf Methoden des Assembly Sequence Plannings zurückgreift und Ergebnisse früherer ähnlicher Planungsfälle nicht wiederverwendet werden, ist unklar, ob das Konzept ebenso auf komplexere Montageprozesse und umfangreiche Produktmodelle ausgelegt ist (vgl. Neb et al. 2021).

RUSCH et al. (2021) verfolgen einen Ansatz zur automatischen Ableitung von Montageanleitungen auf Basis eines formalisierten Prozessmodells. Dieses Prozessmodell beschreibt die Reihenfolge der einzelnen Montageschritte und ist zuvor manuell über eine Editor-Oberfläche einzugeben. In einem zweiten Schritt werden diesen einzelnen Prozessschritten bereits im Informationssystem des Unternehmens vorliegende Metadaten zugeordnet, z.B. Bilder, Videos oder 3D-Modelle. Die Autoren fokussieren sich dabei auf die Definition einer Ontologie zur automatischen Erstellung von Montageanleitungen und beschreiben darin auftretende Objektmodelle von z.B. Montageschritten, Hilfsmitteln oder zusätzlichen Hilfsmaterialien. Es erfolgt keine nähere Beschreibung, ob die Zuordnung der Metadaten zum modellierten Montageprozess automatisiert erfolgt, wodurch dieser Ansatz weiterhin einen hohen manuellen Aufwand im Erstellungsprozess der Montageanleitungen erzeugt (Rusch et al. 2021).

Eine weitere relevante Veröffentlichung von GORS et al. (2021) beschreibt eine Weiterentwicklung des im Vorjahr publizierten Ansatzes, sodass in einem neu entwickelten Rahmenwerk zusätzlich Montageanleitungen für AR-basierte Werkerführungslösungen teilautomatisiert erstellt werden. Ebenso wird detailliert auf die Entwicklung einer standardisierten Ontologie eingegangen, welche auf dem industriellen ISA-95 Standard basiert und somit einen besseren Austausch zwischen beteiligten technischen Systemen ermöglicht. Es wird jedoch nicht beschrieben, inwiefern dieser Standardisierungsansatz für den Datenaustausch dazu verwendet werden könnte, um nicht nur ein spezifisches Werkerführungssystem mit AR-Werkerinformationen zu versorgen, sondern ebenso mehrere Werkerführungssysteme unterschiedlicher Hersteller (vgl. Gors et al. 2021).

ZOGOPOULOS et al. (2022) präsentieren eine automatische Erstellung von AR-basierten Montageanleitungen und führen an, dass auf Grund der zunehmenden Popularität von AR-basierten Werkerführungslösungen ein Bedarf nach einer automatisierten Erstellung von damit auszugebenden Montageanleitungen besteht. Die Autoren stellen darin eine entwickelte Taxonomie vor, welche den Montageprozess sowie die zur Ausführung benötigten Werkerinformationen abbildet. Wie bei ähnlichen Arbeiten im Zeitraum von 2015 bis heute setzt das präsentierte Konzept auf Methoden des Assembly Sequence Plannings und es werden keine Ergebnisse früherer ähnlicher Planungsfälle wiederverwendet (vgl. Zogopoulos et al. 2022).

Alle betrachteten Forschungsvorhaben befassen sich mit der Fragestellung, wie Werkerinformationen möglichst effizient erstellt und anschließend in ein Ausgabesystem übertragen werden. Nachfolgend werden die vorgestellten Ansätze nach definierten Kriterien wie Anwendungsfeld, Ausgabeformat und Unterstützungsgrad eingeordnet und hinsichtlich des in der jeweiligen Veröffentlichung abgedeckten Detailgrads eingeordnet.

### **3.2 Einordnung des Stands der Forschung und Forschungsbedarf**

Um einen möglichst einheitlichen Vergleich der Publikationen zu gewährleisten, werden diese mittels zu definierender Kriterien eingeordnet und nachfolgend durch die Darstellung innerhalb eines Harvey-Balls Diagramms verglichen. Folgende Kriterien wurden aus dem Grundlagenteil aus Kapitel 2 abgeleitet und es wurde jeweils der Verweis zum entsprechenden Grundlagenkapitel angegeben. Diese Kriterien werden nachfolgend zur Einordnung themenverwandter Arbeiten definiert:

**Kriterien-Cluster „Anwendungsfeld der Werkerführung“:** Der einzuordnende Ansatz behandelt eine automatisierte Informationsversorgung von WFS für zumindest einen der folgenden Anwendungsfälle:

- **Montage / Demontage:** Führung von Werkern in Montage oder Demontage von Produkten beziehungsweise Halbfabrikaten (siehe Abschnitt 2.1.1 sowie 2.2.2).
- **Instandhaltung:** Führung von Mitarbeitenden der Instandhaltung in Wartungsprozessen von Maschinen und Anlagen (siehe Abschnitt 2.2.2).
- **Rüsten:** Führung von Maschinenbedienern beim Rüsten und Vorbereiten von Maschinen oder Werkzeugen (siehe Abschnitt 2.2.2).
- **Dokumentation:** Dokumentation von technischen Vorgängen (siehe Abschnitt 2.2.1).

**Kriterien-Cluster „Fokus im Lifecycle“:** Einordnung des Fokus des mit Informationen zu versorgenden WFS:

- **Ausführung:** Werkerführung wird verwendet, um Mitarbeitende durch eine Ausgabe von Informationen bei der Ausführung von wertschöpfenden Tätigkeiten zu unterstützen (siehe Abschnitt 2.2.2).
- **Training:** Werkerführung wird verwendet, um Mitarbeitende durch eine Ausgabe von Informationen zu schulen beziehungsweise zu trainieren (siehe Abschnitt 2.3.1).

**Kriterien-Cluster „Ausgabeformat“:** Einordnung des Ausgabeformats der Werkerführung, welche durch den beschriebenen Ansatz mit Informationen versorgt wird:

- **Papier:** Die Werkerführung erfolgt papierbasiert und ohne elektronische Medien mit ausschließlich statischen Werkerinformationen (Texte, Bilder, Zeichnungen, Listen). Es ist keine Verwendung von dynamischen Werkerinformationen wie z.B. Videos oder Animationen (siehe Abschnitt 2.2.3) möglich.
- **Bildschirm (Text-Bild-Video):** Die Werkerführung erfolgt bildschirmbasiert durch Visualisierung von statischen (Texte, Bilder) sowie dynamischen Werkerinformationen (Videos, 3D-Visualisierung) (siehe Abschnitt 2.2.2).
- **AR/MR/VR:** Die Werkerführung erfolgt mittels Augmented-, Mixed- oder Virtual Reality über ortsfeste Projektoren oder mobile Datenbrillen und VR-Headsets. Die Visualisierung erfolgt statisch (Texte, Bilder) oder dynamisch (Videos, 3D-Visualisierung) (siehe Abschnitt 2.2.2).

**Kriterien-Cluster „Unterstützung in Montageplanung“:** Der einzuordnende Ansatz verwendet eine oder mehreren Methoden zur Unterstützung des planenden Mitarbeitenden bei der Montageplanung (Vorgabe der Montagereihenfolge, zu verwendender Werkzeuge etc.):

- **Editor-System:** Werkerinformationen werden mittels systemspezifischer Editoren geringen Unterstützungsgrads eingegeben oder bearbeitet (siehe Abschnitt 2.3.1).
- **Authoring-System:** Montageplanung erfolgt mittels 3D-basierter Authoring-Software-Werkzeuge hohen Unterstützungsgrades und unabhängig von Hersteller oder Modell des visuellen Werkerführungssystems (siehe Abschnitt 2.3.1).
- **Metadatenbasiert:** Montageplanung erfolgt metadatenbasiert, zum Beispiel mittels zuvor eingegebenen oder im 3D-CAD-Produktmodell hinterlegten Metadaten wie beispielsweise Art der Verbindung oder Schraubparameter (siehe Abschnitt 2.3.3).
- **Assembly Sequence Planning (ASP):** Montageplanung erfolgt auf Grund einer zuvor automatisch abgeleiteten Montagereihenfolge durch Einsatz verschiedener Methoden von ASP. Montageplaner bearbeiten die vorgeschlagene Montagesequenz und fügen bei Bedarf Zusatzinformationen hinzu (siehe Abschnitt 2.3.2).
- **Case-based Reasoning (CBR):** Montageplanung erfolgt auf Grund einer automatisierten Ableitung von Montageplänen von früheren, ähnlichen Produktvarianten durch Nutzung von fallbasiertem Schließen (siehe Abschnitt 2.3.2).
- **Programming by Demonstration (PBD):** Montageplanung erfolgt mittels Demonstration und Aufnahme des Montageprozesses an einem Werkstück mittels technischer Hilfsmittel, zum Beispiel Tiefenbildkamera (siehe Abschnitt 2.3.1).

**Kriterien-Cluster „Automatische Generierung von Informationen“:** Angabe der Art der Werkerinformationen, welche in der betrachteten Arbeit generiert werden:

- **Statisch virtuelle Medien:** Erstellung von statisch virtuellen Medien, zum Beispiel Texte oder Screenshots (siehe Abschnitt 2.2.3).
- **Dynamisch virtuelle Medien:** Erstellung von dynamisch virtuellen Medien, zum Beispiel virtuelle Animationen oder interaktive 3D-Visualisierungen (siehe Abschnitt 2.2.3).
- **Statisch reale Medien:** Erstellung von statisch realen Medien, zum Beispiel Fotos von physischen Objekten (siehe Abschnitt 2.2.3).

- **Dynamisch reale Medien:** Erstellung von dynamisch realen Medien, zum Beispiel Videos von physischen Objekten (siehe Abschnitt 2.2.3).
- **Programme & Konfigurationssätze:** Erstellung von Programmen oder Konfigurationssätzen für Montageobjekte, Hilfsmittel, Werkzeuge und Roboter (siehe Abschnitt 2.3.1).

**Kriterien-Cluster „Ausgabesystem“:** Einordnung der Methode zur Eingabe beziehungsweise Übertragung der Werkerinformationen in das visuelle Werkerführungssystem. Dabei wird unterschieden, ob dieses ein spezifisches WFS ist oder ob mehrere unterschiedliche Werkerführungssysteme als Ziel-WFS möglich sind:

- **Spezifisches WFS:** Eingabe der Werkerinformationen erfolgt automatisiert, wurde jedoch für ein spezielles WFS entwickelt. Eine Ausweitung auf weitere WFS wird nicht beschrieben.
- **Mehrere WFS:** Eingabe der Werkerinformationen erfolgt automatisiert und ist zur Informationsversorgung mehrerer verschiedener WFS geeignet.

Es erfolgt eine Einordnung der themenverwandten Arbeiten mittels Harvey-Balls-Methode. Folgender Einordnungsschlüssel wird dabei angewandt:

**Tabelle 1: Schlüssel zur Einordnung der Arbeiten nach Harvey-Balls-Methode**

	<b>Schwerpunkt:</b> Das betrachtete Kriterium stellt den Schwerpunkt der Arbeit dar und wird umfangreich diskutiert
	<b>Detailliert:</b> Das betrachtete Kriterium wird detailliert diskutiert
	<b>Oberflächlich:</b> Das betrachtete Kriterium wird oberflächlich beschrieben. Es werden keine detaillierten Hintergrundinformationen präsentiert.
	<b>Erwähnung:</b> Das betrachtete Kriterium wird erwähnt, jedoch nicht weiter ausgeführt.
	<b>Nicht behandelt:</b> Das betrachtete Kriterium wird nicht behandelt beziehungsweise ist nicht Teil der untersuchten Arbeit.

Nachfolgende Darstellung gibt einen Überblick über die Einordnung zum Vergleich themenverwandter Arbeiten mittels Harvey-Balls-Methode:

Tabelle 2: Einordnung themenverwandter Arbeiten mittels Harvey-Balls-Methode

Autor, Jahr	Bewertungskriterien												Schwerpunkt	Detailliert	Oberflächlich	Erwähnung	Nicht behandelt						
	Anwendungsfeld der Werkerführung				Fokus im Lifecycle		Ausgabe-format			Unterstützung in Montageplanung								Automatische Generierung von Informationen				Ausgabe-system	
	Montage / Demontage	Instandhaltung	Rüsten	Dokumentation	Ausführung	Training	Papier	Bildschirm (Text-Bild-Video)	AR/MR/VR	Editor	Authoring	Metadatenbasiert	Assembly Sequence Planning (ASP)	Case-based Reasoning (CBR)	Programming by Demonstration (PBD)	Statisch virtuelle Medien	Dynamisch virtuelle Medien	Statisch reale Medien	Dynamisch reale Medien	Programme & Konfigurationssätze	Spezifisches Werkerführungssystem	Mehrere Werkerführungssysteme	
Medelling10	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Mader10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Makris13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Mueller16	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Lusic17	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kajpa18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Funk18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kardos18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Neb18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
BinLi18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Reisinger18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Claeys19	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Blattgerste19	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kardos20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Gors20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Neb21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Rusch21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Gors21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Zogopoulos22	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Im Zuge der Recherche wurde der Fokus auf Arbeiten gelegt, welche eine automatisierte Informationsversorgung von Werkerführungssystemen im Umfeld von Montage- sowie Demontagetätigkeiten beschreiben. Dies ist ebenso in Tabelle 2 zu erkennen, da bei allen untersuchten Forschungsarbeiten das Anwendungsfeld der Werkerführung in der Montage beziehungsweise Demontage von physischen Produkten liegt, während der Einsatz zur Unterstützung bei Instandhaltungs-, Rüst- sowie Dokumentationstätigkeiten nur in zwei Fällen detaillierter betrachtet wird.

Ausgeglichenener ist die Einordnung relevanter Forschungsarbeiten in der Lifecycle-Phase, in welcher eine entsprechende Werkerführung angewandt wird. Beinahe alle untersuchten Arbeiten unterstützen Mitarbeitende bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten, während die Hälfte ebenso für Trainings- sowie Einlerntätigkeiten von Mitarbeitenden verwendet werden. Hinsichtlich der Erstellung von Werkerinformationen ist zu beachten, dass der erforderliche Detailgrad der auszugebenden Informationen bei Trainingstätigkeiten höher ist als bei einer Unterstützung von ausführenden Tätigkeiten. Insbesondere Unternehmen, welche eine Vielzahl von unerfahreneren Mitarbeitenden einschulen, profitieren durch den Einsatz von Werkerführungssystemen zum Training von neuen Mitarbeitenden (vgl. Wolfartsberger et al. 2019), wodurch sich ein Bedarf an detaillierten Werkerinformationen ableiten lässt.

Alle betrachteten Forschungsarbeiten haben das Ziel, Werkerinformationen für die Ausgabe auf Bildschirmen beziehungsweise AR/MR/VR zu erstellen, während eine papierbasierte Darstellung vernachlässigt wird. Auffallend ist weiters, dass die untersuchten Ansätze entweder die Ausgabe auf Bildschirmen oder auf AR/MR/VR fokussieren. Eine Erstellung für beide Ausgabeformate ist lediglich bei drei untersuchten Ansätzen zu erkennen. In Hinblick auf den stetig steigenden Reifegrad sowie einer zunehmenden industriellen Nutzung von AR/MR/VR (vgl. Masood und Egger 2019) wird somit der Bedarf abgeleitet, Werkerinformationen sowohl für eine bildschirmbasierte Ausgabe, als auch für die Darstellung in AR/MR/VR-Systemen automatisiert zu erstellen.

Acht von 19 untersuchten Forschungsarbeiten bieten lediglich eine geringe Unterstützungsleistung im Erstellungsprozess von Werkerinformationen und generieren somit bei menschlichen Anwenderinnen für jede betrachtete Produktvariante einen hohen Bearbeitungsaufwand, indem diese ihr Wissen durch Editoren, Authoring-Lösungen oder eine demonstrations-basierte Programmierung in das System einbringen. Elf Arbeiten hingegen basieren auf einer automatisierten Ableitung von Werkerinformationen auf Grund von vorliegenden Metadaten oder durch

den Einsatz von Methoden des Assembly Sequence Planning (ASP). Bei Methoden des ASP steigt die Anzahl möglicher Montagereihenfolgen und damit die erforderliche Erstellungszeit exponentiell mit der Teileanzahl an, wodurch Ansätze, welche rein auf ASP setzen, derzeit nicht zielführend sind und weiterer Optimierung bedürfen. Von den betrachteten Ansätzen nutzt hingegen keiner die Methode des fallbasierten Schließens (FBS) zur Ableitung von Montagereihenfolgen beziehungsweise Montageinhalten.

Alle betrachteten relevanten Forschungsvorhaben ermöglichen eine automatische Generierung von statisch virtuellen Medien, sind also zeitunabhängig und virtuell generiert, wie beispielsweise Screenshots. Lediglich 8 Forschungsvorhaben behandeln eine Erstellung von dynamisch virtuellen Medien, wie beispielsweise Animationen, zumindest oberflächlich und bieten diese als zusätzliches Informationsausgabeformat neben statisch virtuellen Medien. Die Erstellung von realen statischen sowie dynamischen Medien wird in keiner der untersuchten Forschungsvorhaben detailliert betrachtet. Reale Medien sind unter anderem Fotos sowie Videos, welche in einer realen Umgebung aufgenommen werden. Lediglich in zwei Arbeiten werden diese zumindest erwähnt, es wird jedoch nicht tiefer darauf eingegangen. Auffallend ist, dass lediglich drei der 19 Forschungsvorhaben eine zusätzliche Erstellung von Programmen beziehungsweise Konfigurationssätzen für Werkzeuge ermöglichen. Auf Grund der zunehmenden Anzahl intelligenter sowie kommunikationsfähiger Werkzeuge in Montagesystemen (vgl. Fischer C., Lušić M., Faltus F., Hornfeck R., Franke J. 2016) bietet es sich an, eine automatische Erstellung von Werkerinformationen sowie von Programmen beziehungsweise Konfigurationssätzen gleichzeitig vorzunehmen und dabei auf die gleiche Datengrundlage zurückzugreifen.

Bei den betrachteten Forschungsvorhaben ist zu bemerken, dass diese in 17 von 19 Fällen auf die Erstellung von Werkerinformationen für ein spezifisches Werkerführungssystem beschränkt sind. Eine automatische Erstellung ist somit nur für eine eigens entwickelte, akademische Softwarelösung in der Prototypenphase möglich, nicht jedoch für bereits verbreitete industriell eingesetzte Werkerführungslösungen. Durch die stetig wachsende Anzahl an verfügbaren, unterschiedlichen Werkerführungssystemen entsteht zunehmend ein Bedarf nach standardisierten Schnittstellen zwischen einzelnen Systemmodulen (vgl. Ribeiro und Hochwallner 2018), sodass eine automatische Erstellung von Werkerinformationen nicht nur für ein spezifisches Werkerführungssystem, sondern für eine Vielzahl von unterschiedlichen Werkerführungssystemen abzudecken ist.

**Zusammengefasst weist der dargestellte Stand der Forschung folgenden Forschungsbedarf auf:**

Fokussiert wird jeweils eine Erstellung von Werkerinformationen für bildschirmbasierte Werkerführungslösungen oder für AR/MR/VR. Eine Möglichkeit zur Erstellung von Werkerinformationen für beide Ausgabemodalitäten fehlt und ist zu untersuchen.

Im Erstellungsprozess von Werkerinformationen wird dem menschlichen Anwender nur eine geringe Unterstützungsleistung in Form von Automatisierung angeboten. Eine Vielzahl an Tätigkeiten ist weiterhin manuell auszuführen. Hier liegt also Forschungsbedarf vor, wie eine weitere Steigerung des Automatisierungsgrades zu erreichen ist.

Keiner der untersuchten Ansätze setzt auf eine automatisierte Wiederverwendung von Informationen aus früheren Planungsläufen, wie beispielsweise durch den Einsatz von fallbasiertem Schließen. Zwar wird diese Methodik bereits zur automatisierten Ableitung von Montagereihenfolgen genutzt, jedoch nicht im Kontext der Informationserstellung für Assistenz- bzw. visuelle Werkerführungssysteme eingesetzt. Diese Lücke soll im Zuge dieser Arbeit geschlossen werden, indem durch fallbasiertes Schließen eine Wiederverwendung und Anpassung von Anleitungen an neue Produktvarianten ermöglicht wird.

Die betrachteten Ansätze fokussieren sich lediglich auf eine Erstellung von virtuellen Medien, während keine Vorschläge existieren, welche eine Erstellung oder Nutzung von realen Medien wie Fotos oder Videos erleichtern. Ebenso geht mit der Erstellung von Werkerinformationen eine Erstellung von Konfigurationssätzen für Werkzeuge einher, wobei dies in keiner der betrachteten Arbeiten unterstützt, beziehungsweise diskutiert wird. Es ergibt sich somit Forschungsbedarf hinsichtlich einer möglichen automatisierten Konfiguration von Werkzeugen im Zuge des Informationsversorgungsprozesses visueller Werkerführungssysteme.

Ansätze, welche bereits einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen, nutzen Methoden des Assembly Sequence Plannings (ASP), welche lediglich bei kleineren Baugruppen und begrenzter Teileanzahl eine wirtschaftlich anwendbare Verarbeitungszeit aufweisen (Neb 2019). Somit besteht Forschungsbedarf zur Automatisierung der Informationserstellung visueller Werkerführungssysteme, ohne auf Methoden des ASP zurückgreifen zu müssen.

Keine der untersuchten Forschungsarbeiten ermöglicht eine automatisierte Erstellung von Werkerinformationen für beliebige Ausgabesysteme (Werkerführungssysteme)

beziehungsweise Ausgabemodalitäten. Die Arbeiten beziehen sich stattdessen in 17 von 19 Fällen auf eigens entwickelte Werkerführungslösungen im akademischen Umfeld. In Hinblick auf die immer weiter steigende Anzahl unterschiedlicher Werkerführungslösungen am Markt besteht hier Forschungsbedarf für eine möglichst systemneutrale Informationsversorgung.

### 3.3 Zielsetzung und Forschungsfrage

Der Stand der Forschung beinhaltet einzelne Teillösungen, welche eine Aufwandsreduktion in der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme begünstigen; die Automatisierungspotenziale werden allerdings nicht vollständig ausgeschöpft. Es fehlt ein ganzheitliches und durchgängiges Vorgehen, um ausgehend von im Unternehmen vorliegenden Produktdaten (zum Beispiel 3D-CAD-Konstruktionsmodelle) bei möglichst geringem manuellem Zeitaufwand eine vollständig konfigurierte visuelle Werkerführungslösung zu erreichen. Dieses fehlende Vorgehensmodell wird im Zuge dieser Arbeit entwickelt.

Ziel der Arbeit ist somit die Entwicklung eines ganzheitlichen und durchgehenden Vorgehensmodells um zeitliche Aufwände manueller Informationsversorgungsprozesse visueller Werkerführungssysteme durch den gezielten Einsatz von Algorithmen, Heuristiken, selbstlernenden Expertensystemen und Standardisierung bei gleichbleibender Ergebnisqualität zu reduzieren. Darüber hinaus wird die Verbreitung visueller Werkerführungssysteme gefördert, die Montage hochvarianter Produkte bei Kleinstserien ermöglicht und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Produktionsunternehmen gesteigert.

Die Zielsetzung umfasst folgende Subzielsetzungen:

- **Subzielsetzung 1:** Identifikation der technischen, organisatorischen und benutzerorientierten Anforderungen an ein Vorgehensmodell im industriellen Umfeld, um zeitliche Aufwände in der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme signifikant zu senken.
- **Subzielsetzung 2:** Identifikation von Automatisierungsmöglichkeiten im aktuellen Prozess zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme zur Reduktion zeitlicher Aufwände in der Arbeitsvorbereitung.
- **Subzielsetzung 3:** Definition von Merkmalen und Ausprägungen, welche ein Vorgehensmodell aufzuweisen hat, um zeitliche Aufwände für die Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme unter Nutzung von

Algorithmen, Heuristiken, selbstlernenden Expertensystemen und Standardisierung signifikant zu senken.

Aus der Zielsetzung sowie den Subzielsetzungen der Arbeit lässt sich folgende zielorientierte Forschungsfrage ableiten, welche im Zuge dieser Arbeit beantwortet wird:

**Wie ist ein Vorgehensmodell im industriellen Umfeld zu gestalten, um zeitliche Aufwände im Informationsversorgungsprozessen visueller Werkerführungssysteme durch Automatisierung zu reduzieren?**

Ergebnis der Arbeit ist ein Vorgehensmodell, welches zuvor identifizierte Automatisierungspotenziale im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme adressiert und als Software-Artefakt implementiert wird. Ausgehend von 3D-CAD-Konstruktionsmodellen und Stücklisteninformationen wird damit automatisiert bei möglichst geringem manuellem Zeitaufwand eine für die aktuell zu produzierende Produktvariante vollständig konfigurierte visuelle Werkerführungslösung erreicht. Das Vorgehensmodell wird anschließend hinsichtlich Auswirkungen auf Effektivität sowie Effizienz des Arbeitsvorbereitungsprozesses untersucht. Für die Validierung des Vorgehensmodells wird das Montagesystem der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 herangezogen.

### 3.4 Kritische Reflexion und Zusammenfassung

Kapitel 3 stellt den Stand der Forschung, den identifizierten Forschungsbedarf sowie Zielsetzung und Forschungsfrage dar und deckt damit die erste Phase „Problem identifizieren, motivieren“ des DSRM-Nominalprozesses ab. In relevanten Literaturstellen wird angemerkt, dass die Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme hohe zeitliche Aufwände je Produktvariante und damit einhergehende hohe Personalkosten in der Arbeitsvorbereitung verursacht. Dies führt zu einem verminderten Wertschöpfungsanteil und erfahrene Prozessexperten der Arbeitsvorbereitung investieren einen hohen Zeitaufwand in die Erstellung von Werkeranweisungen, anstatt eine Optimierung der wertschöpfenden Tätigkeiten sowie Prozesse zu betreiben. Dieser Umstand führt dazu, dass diese Prozessexperten einer Über- oder Unterforderung ausgesetzt werden und ihre Motivation zur Erstellung von Anleitungen sinkt. Dies ist insofern problematisch, da aktuelle Trends auf eine weiter steigende Nachfrage nach individuellen Produkten und somit höheren Planungsfrequenzen hinweisen und sich zugleich ein hoher Fachkräftemangel am Arbeitsmarkt abzeichnet. Herausfordernd ist weiters, dass am Anbietermarkt eine Vielzahl unterschiedlicher visueller Werkerführungssysteme verfügbar sind und der

Prozess der Arbeitsvorbereitung ebendieser Systeme ein ausgeprägtes Spezialwissen in Programmierung, CAD-Modellierung sowie Systemkonfiguration erfordern.

Der Stand der Forschung beinhaltet einige themenverwandte Arbeiten, welche eine ähnliche Ausgangssituation, Problemstellung oder Ansatz wie die vorliegende Arbeit verfolgen. Während der Fokus früherer Arbeiten auf der Dokumentation von technischen Prozessen liegt, mehren sich seit Definition von Industrie 4.0 die Anzahl themenverwandter Arbeiten zur Informationsversorgung von Werkerführungssystemen insbesondere im Anwendungsfeld der Montage. Jede der dargestellten themenverwandten Arbeiten deckt auch eine oder mehrere der in Abschnitt 2.3 dargestellten Teillösungen ab: Authoring-Tools dienen als Eingabeoberfläche von Werkerinformationen für die Arbeitsvorbereitung und werden in systemspezifische Editoren mit geringem Unterstützungsgrad sowie softwarebasierte Eingabewerkzeuge mit hohem Unterstützungsgrad unterschieden. Eine automatische Ableitung von Montagereihenfolgen, welches in der Literatur als Assembly Sequence Planning bezeichnet wird, stellt eine wertvolle Unterstützung bei der Montageplanung dar. Jedoch sind diese dargestellten Algorithmen rechenintensiv und ermöglichen lediglich eine Ermittlung von Montagereihenfolgen, jedoch keine Unterteilung in einzelne Montageschritte. Fallbasiertes Schließen wird zur Ableitung von Montageplänen auf Grund einer sich stets vergrößernden Fallbasis angewandt und birgt ein großes Aufwandsreduktionspotenzial. Physische oder virtuelle Teach-In-Verfahren erfreuen sich auf Grund einer zunehmend intelligenten Sensorik am Arbeitsplatz großer Beliebtheit, erfordern jedoch die Durchführung der Montage an zumindest einem Stück, sodass es nicht für kleinste Losgrößen geeignet ist. Automatisierte Text- und Mediengenerierung ermöglicht bei Vorhandensein erforderlicher Informationen eine große Aufwandsreduktionen, ist jedoch nur in Kombination mit intelligenten Schnittstellen effizient nutzbar, sodass automatisiert abgeleitete Werkerinformationen in das visuelle Werkerführungssystem übertragen werden. Gütegrad beziehungsweise Ausprägungsform der Unterstützung der AV-Mitarbeitenden variieren und sind in manchen dargestellten Arbeiten entweder noch niedrig oder kommen nur bei spezifischen Werkerführungssystemen vollends zur Geltung. Alle identifizierten Forschungsvorhaben wurden in Tabelle 2 übersichtlich dargestellt und hinsichtlich zuvor definierter Kriterien eingeordnet.

Zusammengefasst beinhaltet der Stand der Forschung somit einzelne Ansätze zur Reduktion manueller Aufwände im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme, wobei Automatisierungspotenziale nicht vollständig ausgeschöpft werden. Eine ganzheitliche und durchgängige Vorgehensweise fehlt, um ausgehend von produktbeschreibenden Daten wie 3D-CAD-Modellen oder

Stücklisteninformationen bei geringem manuellem Arbeitseinsatz eine vollständig konfigurierte visuelle Werkerführungslösung zu erreichen. Das definierte Ziel dieser Arbeit lautet somit, diese fehlende Vorgehensweise zu entwickeln und zeitliche Aufwände manueller Informationsversorgungsprozesse visueller Werkerführungssysteme durch den gezielten Einsatz von Algorithmen, Heuristiken, selbstlernenden Expertensystemen und Standardisierung bei gleichbleibender Ergebnisqualität zu senken. Diese Zielsetzung gliedert sich in drei Subzielsetzungen, welche im folgenden Teil dieser Arbeit erfüllt, beziehungsweise beantwortet werden.

## 4 Ist-Analyse und Anforderungsableitung

Im vorliegenden Kapitel erfolgt zunächst eine Analyse und qualitative Beschreibung des aktuellen Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme. Dies ist erforderlich, um den aktuellen Stand in den meisten Produktionsunternehmen abzubilden und den dabei verfolgten, manuellen Prozess hinsichtlich Verschwendungen, Verbesserungs- und Automatisierungspotenzialen zu analysieren. Einzelne Teilschritte im analysierten Prozess erfordern manuelle, zeitliche Aufwände, welche durch ein mathematisches Modell quantitativ beschrieben werden. Abschließend werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell durch eine Kombination aus Recherche sowie Interviews mit potenziellen Anwendern erarbeitet. Das vorliegende Kapitel entspricht somit der zweiten Phase des DSRM-Nominalprozesses („Wie soll das Problem gelöst werden?“).

### 4.1 Ist-Analyse des aktuellen Informationsversorgungsprozesses

Um eine Reduktion menschlicher Arbeitsaufwände durch eine Automatisierung des Informationsversorgungsprozesses zielgerecht zu realisieren, wird zunächst der aktuelle Prozess für die Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme erarbeitet und als Basis für die spätere Entwicklung des Vorgehensmodells herangezogen. Zur quantifizierten Bewertung einzelner Teilschritte des aktuellen Prozesses erfolgt eine mathematische Modellierung erforderlicher zeitlicher Aufwände der Prozessschritte. Der analysierte Informationsversorgungsprozess und das mathematische Modell erlauben zusammen somit eine deskriptive sowie quantifizierbare Beschreibung der bestehenden Situation in Unternehmen, welche visuelle Werkerführungssysteme einsetzen und diese mit Informationen versorgen. Diese Herangehensweise ermöglicht es, in einem späteren Schritt das eigentliche Problem, als auch Potential, quantitativ zu bestimmen.

Grundlage für vorliegende Prozessanalyse sind durchgeführte Literaturrecherchen und Interviews mit potenziellen Anwendern aus der industriellen Praxis sowie mit Herstellern von Werkerführungssystemen. Der Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme wird in drei Abschnitte unterteilt:

- Montageplanung durchführen: Vorgabe der Montagereihenfolge, der zu verwendenden Werkzeuge und Hilfsmittel
- Werkerinstruktionen erstellen: Verfassen von Anweisungstexten sowie Erstellung von Bildern und Videos

- Werkerinstruktionen eintragen: Aufbereitete Werkerinformationen in die Datenbank beziehungsweise Speichermedien des zu verwendenden visuellen Werkerführungssystems eintragen

In nachfolgender Abbildung 14 wird der aktuelle Prozess der Informationsversorgung grafisch als UML 1.0 Aktivitätsdiagramm dargestellt. Auf der linken Seite wird durch ein Mensch-Symbol verdeutlicht, welche der einzelnen Aktivitäten – dargestellt als abgerundete Rechtecke – von Mitarbeitenden der Arbeitsvorbereitung durchzuführen sind. Die dafür erforderlichen zeitlichen Aufwände werden als Variable  $t_x$  dargestellt und im Zuge einer mathematischen Modellierung näher erläutert. Als Startpunkt des dargestellten Informationsversorgungsprozesses dient die Annahme eines Planungsauftrags durch einen AV-Mitarbeiter, während als Endpunkt die Freigabe zur nachfolgenden Verwendung der erstellten Werkerinformationen definiert wird. Als Anwenderin beziehungsweise Anwender des aktuellen Prozesses werden im Zuge dieser Arbeit Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung (nachfolgend „AV-Mitarbeiter“) definiert. Diese Rollenzuordnung kann im praktischen Einsatz in industriellen Unternehmen abweichen. In Gesprächen mit Anwendern wurde erhoben, dass die Informationsversorgung von Mitarbeitenden der Arbeitsvorbereitung, des Industrial Engineerings, der Produktionsplanung, der Montageplanung oder der Montageausführung durchgeführt wird.

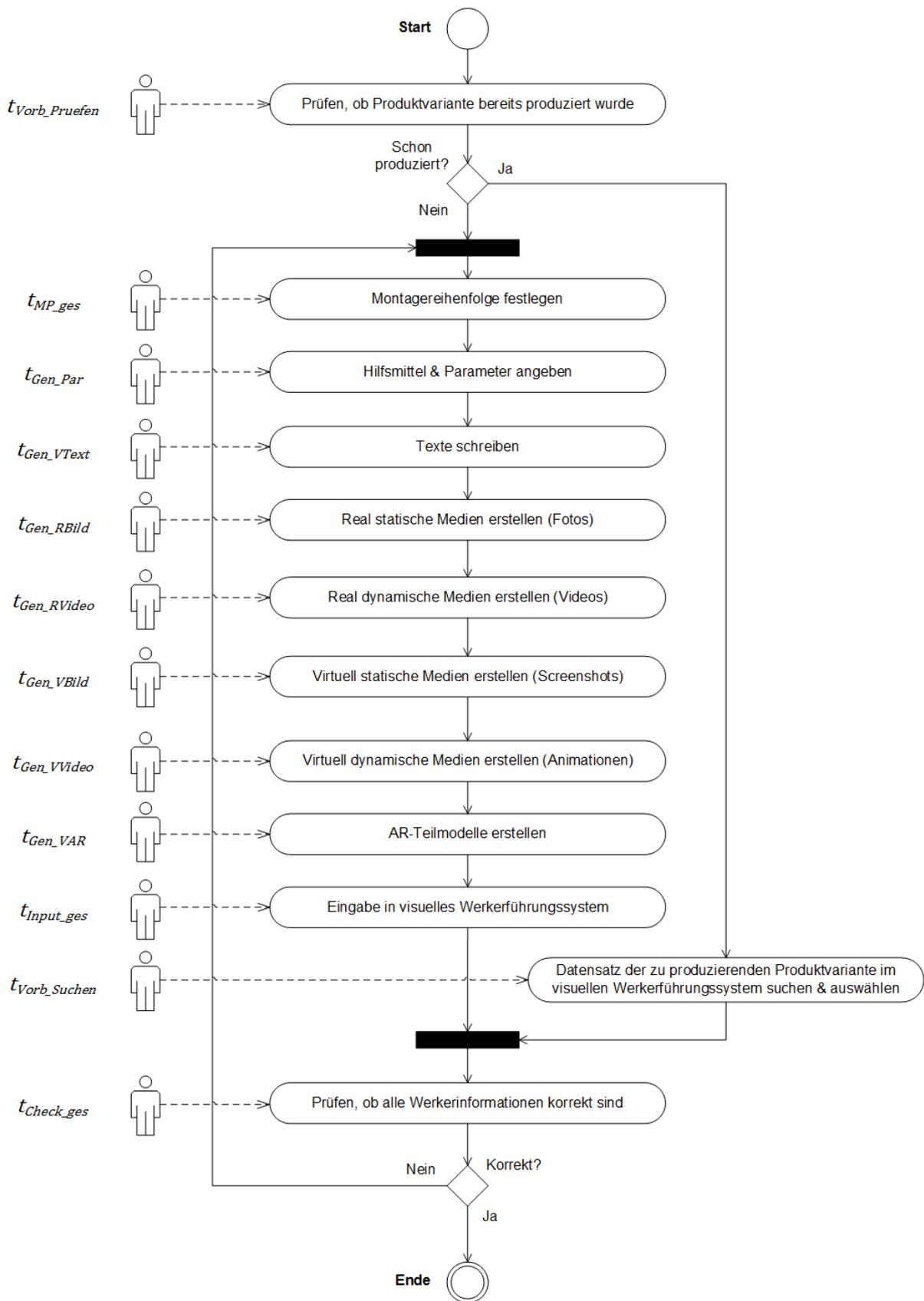


Abbildung 14: Aktueller Prozess (Ist-Zustand) zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme (UML 1.0 Aktivitätsdiagramm)

### Beschreibung des analysierten aktuellen Prozesses (Ist-Zustand):

Nachfolgend wird der in Abbildung 14 dargestellte Informationsversorgungsprozess erläutert und durch ein mathematisches Modell erweitert. Dieses mathematische Modell ermöglicht eine Quantifizierung der zeitlichen Aufwände der einzelnen Prozessschritte. Dazu werden Formeln zur Kalkulation der einzelnen zeitbezogenen Aufwände im aktuellen Prozess definiert. Das mathematische Modell wurde als Excel-Berechnungsblatt zur überschlägigen Kalkulation von Gesamtzeit und zeitbezogenen Anteilen implementiert. Die nachfolgenden Formeln 1-4 zur Berechnung des Werts von  $t_{y\_ges}$  kann sowohl als Summenformel dargestellt werden, sowie vereinfacht als Produkt der Anzahl der Schritte  $x_{Schritte}$  und der durchschnittlichen erforderlichen Zeit pro Schritt  $t_{Y\_pSchr}$ .

Ein AV-Mitarbeiter (nachfolgend „Anwender“) analysiert zunächst einen durchzuführenden Planungsauftrag, welcher unter anderem Informationen über die Kundin beziehungsweise den Kunden, den zugehörigen Produktionsauftrag, eine Terminplanung sowie Daten der zu montierenden Produktvariante und deren Gestaltung enthält. Dabei wird geprüft, ob die zu montierende Produktvariante früher bereits produziert wurde und für die Montage benötigte Werkerinformationen bereits als Datensatz in der Datenbank der visuellen Werkerführung vorliegen. Dabei fallen Suchaufwände  $t_{Vorb\_Pruefen}$  an, welche die Dauer der Analyse des Planungsauftrags sowie der Prüfung, ob Werkeranweisungen für diese Produktvariante bereits in einem früheren Planungsdurchgang erstellt wurden, quantifizieren. Die Zeitvariable  $t_{Vorb\_Pruefen}$  (Einheit „Sekunden“) ist dabei von folgenden Einflussfaktoren abhängig: Allgemeine Erfahrung der Arbeitsvorbereitung, Erfahrung der Arbeitsvorbereitung mit der Produktfamilie der zu produzierenden Produktvariante, verwendete Hilfssoftware und Datenverwaltungsqualität im Unternehmen.

Hier sind drei unterschiedliche Ergebnisse möglich:

- Fall 1: Keine Wiederverwendung möglich: Es wird die Entscheidung getroffen, dass keine Wiederverwendung von Anleitungen bzw. Datensätzen sinnvoll ist und die gesamte Planung von Grund auf neu angestoßen wird.
- Fall 2: Teilweise Wiederverwendung möglich: Eine bereits bestehende Anleitung für eine ähnliche Produktvariante existiert und ist dem Anwendenden bekannt. Diese wird dupliziert und dient anschließend als Grundlage für die weitere manuelle Planung.
- Fall 3: Exakte Wiederverwendung möglich: Eine in der Vergangenheit erstellte Anleitung kann vollständig wiederverwendet werden und für die Montage der neu zu planenden Produktvariante verwendet werden.

Fall 1 und Fall 2: Wurde diese Produktvariante hingegen noch nicht montiert beziehungsweise liegen entsprechende Werkerinformationen noch nicht in gewünschter Qualität vor, ist der eigentliche Informationserstellungsprozess anzustoßen.

Fall 3: Wurde diese Produktvariante früher bereits montiert und liegen dazu passende Werkerinformationen in erforderlicher Qualität vor, kann dieser Datensatz durch Einsatz eines zeitlichen Aufwands  $t_{Vorb\_Suchen}$  (Einheit „Sekunden“) gesucht und wiederverwendet werden. Voraussetzung dafür ist, dass während dieses Suchvorgangs auch geprüft wird, ob die vorliegenden Anleitungen für die zu produzierende Produktvariante noch aktuell sind. Dies erfordert eine manuelle Prüfung und ein Vorhandensein entsprechender Informationen beim auszuführenden Mitarbeitenden bzw. innerhalb einer Wissensdatenbank. Die dafür benötigte Zeit ist auf Grund der hohen Ähnlichkeit dieser Tätigkeiten von den gleichen Einflussfaktoren abhängig wie  $t_{Vorb\_Pruefen}$ .

Der für die Vorbereitung des Informationsversorgungsprozesses erforderliche zeitliche Gesamt-Aufwand wird somit durch nachfolgende Formel wie folgt zusammengefasst:

$$t_{Vorb\_ges} = \begin{cases} t_{Vorb\_Pruefen} + t_{Vorb\_Suchen} & \text{falls Datensatz Vorhanden} \\ t_{Vorb\_Pruefen} & \text{falls Datensatz nicht vorhanden} \end{cases}$$

#### Formel 1: Zeitlicher Gesamt-Aufwand für Vorbereitung

Wie im aktuellen Ist-Prozess in Abbildung 14 sowie Formel 1 ersichtlich, wird bei der Berechnung des Gesamt-Aufwands für die Vorbereitung unterschieden, ob der richtige Datensatz der zu planenden Produktvariante bereits vorhanden ist. Für den Fall, dass dieser bereits vorliegt, fallen ausschließlich Prüf- und Suchaufwände an und der weitere Informationsversorgungsprozess muss nicht durchgeführt werden. Ist der Datensatz hingegen nicht vorhanden, fallen keine Such-Aufwände  $t_{Vorb\_Suchen}$  an, jedoch werden in diesem Fall die weiteren Schritte der Informationsversorgung durchgeführt.

Auf Grund der vorliegenden Produktdaten – beispielsweise virtuelles Produktmodell, Zeichnungen oder Stücklisten – wird zunächst ein Montageplan erstellt. Dabei werden Montagereihenfolge, zu montierende Bauteile und Komponenten sowie zu verwendende Werkzeuge und Hilfsmittel festgelegt. Die Darstellung des Montageplans erfolgt als Tabelle, wobei Spalten die soeben genannten Informationen und Zeilen die einzelnen festgelegten Montageschritte darstellen. Dabei anfallende

zeitliche Aufwände werden durch die Variablen  $t_{MP\_ges}$  für die Vorgabe der Montagereihenfolge beschrieben:

$$t_{MP\_ges} = \sum_i^{x_{Schritte}} t_{MP\_i} = t_{MP\_pSchr} * x_{Schritte}$$

### Formel 2: Zeitlicher Gesamt-Aufwand für Montageplanung

Die Ganzzahlvariable  $x_{Schritte}$  (Einheit „1“) gibt die Anzahl der von der Arbeitsvorbereitung festgelegten Montageschritte an und ist von der Anzahl der Bauteile des Produkts, der Komplexität des Produkts, der allgemeinen Erfahrung der Arbeitsvorbereitung sowie der Erfahrung der Arbeitsvorbereitung mit der zu planenden Produktfamilie abhängig.

Die Zeitvariable  $t_{MP\_pSchr}$  (Einheit „Sekunden“) gibt die Zeit an, welche für die Montageplanung eines Montageschrittes benötigt wird und ist von der Erfahrung der Arbeitsvorbereitung allgemein, der Erfahrung der Arbeitsvorbereitung mit der zu planenden Produktfamilie, der Anzahl der Bauteile, der Komplexität des Produkts, dem Vorhandensein eines virtuellen Prototyps, der Komplexität des virtuellen Prototyps und der Qualität der verwendeten Hilfssoftware (sofern vorhanden) abhängig.

Während der Montageplanung erfolgt die Festlegung von Parametern, beispielsweise zur Ansteuerung von Werkzeugen und Hilfsmitteln (zum Beispiel Schraubmomente), deren zeitlicher Aufwand durch die Zeitvariable  $t_{Gen\_Par\_ges}$  quantifiziert wird.

Im Anschluss an die Montageplanung erfolgt eine Erstellung der Werkeranweisungen der einzelnen Montageschritte mit anfallenden zeitlichen Aufwänden  $t_{Gen\_VText}$ . Ein AV-Mitarbeiter formuliert Anweisungstexte zur Beschreibung durchzuführender Tätigkeiten sowie zu verwendenden Produktkomponenten und Werkzeugen. Dabei ist auf eine Erstellung eindeutiger sowie effizient lesbarer Texte zu achten, beispielsweise durch eine einheitliche Verwendung von Farben und Formatierungen. Zu beachten ist weiters, dass Anweisungstexte von der gewünschten Sprache des Informationskonsumenten (Montagemitarbeiter) abhängig sind und somit in mehreren Versionen bzw. in unterschiedlichen Sprachen zu erzeugen sind. Eine Aufbereitung von realen, statischen Medien umfasst die Erstellung von Abbildungen realer Werkobjekte in Form von Fotos und wird durch die Variable  $t_{Gen\_RBild}$  quantifiziert. Dies erfordert die Vorbereitung und schrittweise Montage eines physisch vorliegenden Produkts, um einen Montageprozess fotografieren zu können. Die erstellten Fotos werden anschließend auf einen Computer transferiert und bei Bedarf nachbearbeitet.

Analog erfolgt die Erstellung von realen, dynamischen Medien. Dies umfasst die Erstellung von Bewegtbildern in Form von Videos von physischen Werkobjekten und der erforderliche zeitliche Aufwand wird durch  $t_{Gen\_RVideo}$  quantifiziert. Eine Erstellung von virtuellen statischen Medien erfordert das Vorhandensein eines virtuellen Produktmodells (zum Beispiel 3D-CAD Modell) der zu montierenden Produktvariante und umfasst die Erstellung von Screenshots mit Zeitaufwand  $t_{Gen\_VBild}$ . Dabei werden beispielsweise die im aktuellen Montageschritt zu montierenden Komponenten farblich hervorgehoben und durch Linien, Pfeile, Texte oder andere geometrische Figuren näher beschrieben. Durch eine Nutzung von Animationssoftware erfolgt analog dazu eine Ableitung von virtuellen dynamischen Medien mit Zeitaufwand  $t_{Gen\_VVideo}$ . Dabei werden die im aktuellen Montageschritt zu montierenden Produktkomponenten entlang von manuell festgelegten oder berechneten Bewegungspfaden animiert. Im Falle einer Werkerführung mit Augmented Reality sind virtuelle 3D-Teilmodelle zu erstellen. Diese virtuellen 3D-Teilmodelle stellen dabei die im aktuellen Montageschritt zu montierenden Produktkomponenten isoliert dar und werden schrittweise als virtuelle Information der realen Umgebung überblendet. Für die Erstellung dieser 3D-Teilmodelle werden erforderliche zeitliche Aufwände durch die Variable  $t_{Gen\_VAR}$  beschrieben.

Die Formel zur Kalkulation zeitlicher Aufwände zur Erstellung von Medien bzw. einzelne Werkerinformationen wird als Summenprodukt dargestellt (siehe Formel 3). Dabei wird für die Erstellung der einzelnen Medientypen jeweils das Produkt der Anzahl der zu erstellenden Medien  $x_{Gen\_m}$  und der dafür benötigten Zeit  $t_{Gen\_m\_pSchr}$  gebildet und die einzelnen Produkte anschließend summiert. Die Variable  $i$  wird dabei als Laufvariable der Menge  $M$  verwendet:

$$t_{Gen\_ges} = \sum_m^M \sum_i^{x_{Schritte}} t_{Gen\_m\_i} = \sum_m^M t_{Gen\_m\_pSchr} * x_{Gen\_m}$$

$$M = \left\{ \begin{array}{l} VText, RBild, VBild, \\ RVideo, VVideo, VAR, Par \end{array} \right\}$$

**Formel 3: Zeitlicher Gesamt-Aufwand für Erstellung von Medien der Menge M**

Die Einführung der Mengenvariable  $M$  dient einer einfachen Darstellung der zeitlichen Gesamt-Aufwände zur Erstellung von Medien als Summenformel und gibt dabei die Medientypen der zu erstellenden Werkerinformationen an:

- $VText$ : Formulierung von Anweisungstexten
- $RBild$ : Aufnahme von realen Bildern (zum Beispiel Kamerafoto)

- *VBild*: Ableitung von virtuellen Bildern (zum Beispiel Screenshot)
- *RVideo*: Aufnahme von realen Videos (zum Beispiel Kameravideo)
- *VVideo*: Ableitung von virtuellen Animationen (zum Beispiel 3D-Animation)
- *VAR*: Ableitung von virtuellen Teilmodellen für die AR-Werkerführung
- *Par*: Erstellung von Parametersätzen für Werkzeuge, Mess- und Prüfmittel

Die MengenvARIABLE  $x_{Gen\_m}$  gibt die Anzahl der zu erstellenden Medien je Medientyp an, wobei die Laufvariable  $m$  den Medientyp angibt. Die Zeitvariable  $t_{Gen\_m\_pSchr}$  gibt die Zeit in Sekunden an, welche für die Erstellung eines Mediums je Medientyp  $m$  aufgewendet wird.

Für die Formulierung von Anweisungstexten im Falle  $m = VText$  ergeben sich für  $t_{Gen\_VText\_pSchr}$  folgende identifizierte Einflussfaktoren: Anzahl unterschiedlicher Sprachen, allgemeine Erfahrung der Arbeitsvorbereitung, Anzahl der Bauteile des Produkts, Sprachkenntnis der Arbeitsvorbereitung sowie verwendete Hilfssoftware (sofern vorhanden).

Für die Aufnahme von realen Bildern im Falle  $m = RBild$  ergeben sich für  $t_{Gen\_RBild\_pSchr}$  folgende identifizierte Einflussfaktoren: Existenz eines physischen Prototyps, Komplexität des physischen Prototyps (sofern vorhanden), allgemeine Erfahrung der Arbeitsvorbereitung sowie verwendete Hilfssoftware (sofern vorhanden).

Für die Ableitung von virtuellen Bildern im Falle  $m = VBild$  ergeben sich für  $t_{Gen\_VBild\_pSchr}$  folgende identifizierte Einflussfaktoren: Existenz eines virtuellen Prototyps, Komplexität des virtuellen Prototyps (sofern vorhanden), allgemeine Erfahrung der Arbeitsvorbereitung sowie verwendete Hilfssoftware (sofern vorhanden).

Für die Aufnahme von realen Videos im Falle  $m = RVideo$  ergeben sich für  $t_{Gen\_RVideo\_pSchr}$  folgende identifizierte Einflussfaktoren: Existenz eines physischen Prototyps, Komplexität des physischen Prototyps (sofern vorhanden), allgemeine Erfahrung der Arbeitsvorbereitung sowie verwendete Hilfssoftware (sofern vorhanden).

Für die Ableitung von virtuellen Animationen im Falle  $m = VVideo$  ergeben sich für  $t_{Gen\_VVideo\_pSchr}$  folgende identifizierte Einflussfaktoren: Existenz eines virtuellen Prototyps, Komplexität des virtuellen Prototyps (sofern vorhanden), allgemeine

Erfahrung der Arbeitsvorbereitung sowie verwendete Hilfssoftware (sofern vorhanden).

Für die Ableitung von virtuellen Teilmodellen für AR-Werkerführung im Falle  $m = VAR$  ergeben sich für  $t_{Gen\_VAR\_pSchr}$  folgende identifizierte Einflussfaktoren: Existenz eines virtuellen Prototyps, Komplexität des virtuellen Prototyps (sofern vorhanden), allgemeine Erfahrung der Arbeitsvorbereitung sowie verwendete Hilfssoftware (sofern vorhanden).

Für die Erstellung von Parametersätzen für Werkzeuge, Mess- und Prüfmittel im Falle  $m = Par$  ergeben sich für  $t_{Gen\_Par\_pSchr}$  folgende identifizierte Einflussfaktoren: Anzahl der Bauteile der Produktvariante, allgemeine Erfahrung der Arbeitsvorbereitung, Ausgestaltung des Systemumfelds sowie verwendete Hilfssoftware (sofern vorhanden).

Nach erfolgter Aufbereitung der Werkeranweisungen werden diese in die Datenbank beziehungsweise das Dateisystem der zu verwendenden visuellen Werkerführung eingegeben. Die in industriellen Produktionsunternehmen eingesetzten Softwarepakete visueller Werkerführungssysteme bieten dafür eine grafische Eingabeoberfläche (Editor) an. Auf diese wird vom AV-Mitarbeiter über einen Computer zugegriffen, sodass Montageauftrag, festgelegte Montageschritte sowie Werkeranweisungen der einzelnen Schritte eingegeben werden. Die bei der Eingabe anfallenden zeitlichen Aufwände werden durch die Variable  $t_{Input\_ges}$  quantifiziert. Dafür ist eine Schulung der AV-Mitarbeitenden zur Bedienung der grafischen Eingabeoberfläche des visuellen Werkerführungssystems erforderlich. Liegen im Produktionsumfeld mehrere unterschiedliche Werkerführungssysteme vor, ist dieser Schulungsprozess mehrmals zu wiederholen beziehungsweise es sind genau die AV-MitarbeiterInnen einzusetzen, welche für das aktuell zu versorgende Werkerführungssystem geschult sind.

Der erforderliche zeitliche Gesamt-Aufwand zur Eintragung der erstellten Werkerinformationen in das visuelle Werkerführungssystem setzt sich aus einem fixen und einem variablen Zeitanteil zusammen:

$$t_{Input\_ges} = t_{Input\_fix} + \sum_i^{x_{Schritte}} t_{Input\_i} = t_{Input\_fix} + t_{Input\_pSchr} * x_{Schritte}$$

**Formel 4: Zeitlicher Gesamt-Aufwand zur Eintragung der Instruktionen in das WFS**

Die Zeitvariable  $t_{Input\_fix}$  (Einheit „Sekunden“) gibt den fixen Zeitanteil an, welche für die Eingabe der erstellten Werkerinstruktionen in das Werkerführungssystem einmalig aufzuwenden ist. Diese Variable ist von der allgemeinen Erfahrung der Arbeitsvorbereitung sowie der Komplexität der Eingabemaske abhängig.

Die Zeitvariable  $t_{Input\_pSchr}$  (Einheit „Sekunden“) gibt den variablen zeitlichen Aufwand an, welcher für eine Eingabe der erstellen Werkerinstruktionen in das Werkerführungssystem je Schritt benötigt wird und ist von denselben Einflussfaktoren wie  $t_{Input\_fix}$  abhängig.

Sobald alle Werkerinformationen in der Datenbank des visuellen Werkerführungssystems vorliegen, erfolgt eine abschließende Prüfung der Korrektheit der Werkerinformationen mit zeitlichem Aufwand  $t_{Check\_ges}$ . Diese abschließende Kontrolle erfolgt entweder direkt über die Eingabeoberfläche, mittels einer für diese Tätigkeit eigens angepassten Oberfläche oder direkt durch Nutzung der visuellen Werkerführung in der für den Montagemitarbeiter dargestellten Ansicht. Im Falle von Fehlern oder Abweichungen, sind einzelne Schritte der Informationserstellung sowie Informationseingabe zu wiederholen. Sobald alle Werkerinformationen korrekt sind, erfolgt eine Freigabe ebendieser, sodass der Informationsversorgungsprozess der visuellen Werkerführung abgeschlossen wird und die Werkerführung zur Unterstützung der Montagemitarbeitenden einsetzbar ist.

Der erforderliche zeitliche Gesamt-Aufwand zur Prüfung und Freigabe der Werkerinformationen setzt sich aus einem fixen und einem variablen Zeitanteil zusammen:

$$t_{Check\_ges} = t_{Check\_fix} + \sum_i^{x_{Schritte}} t_{Check\_i} = t_{Check\_fix} + t_{Check\_pSchr} * x_{Schritte}$$

**Formel 5: Zeitlicher Gesamt-Aufwand zum Prüfen und Freigeben der Instruktionen**

Die Zeitvariable  $t_{check\_fix}$  (Einheit „Sekunden“) gibt den fixen Zeitanteil an, welcher für die Prüfung und Freigabe der eingegebenen Werkerinstruktionen einmalig benötigt wird und ist lediglich von der Erfahrung der Mitarbeitenden der Arbeitsvorbereitung abhängig.

Die Zeitvariable  $t_{check\_pSchr}$  (Einheit „Sekunden“) gibt den variablen Zeitanteil an, welcher für die Prüfung und Freigabe der eingegebenen Werkerinstruktionen je Schritt benötigt wird und ist von denselben Einflussfaktoren wie  $t_{check\_fix}$  abhängig.

Nach erfolgter Prüfung und Freigabe der erstellten Instruktionen gilt der Informationsversorgungsprozess als abgeschlossen und die eigentliche Montage des geplanten Produkts ist von Mitarbeitenden durchführbar. Formel 6 stellt den erforderlichen zeitlichen Gesamt-Aufwand der Arbeitsvorbereitung dar und setzt sich aus der Summe der zuvor definierten Zeitaufwände (Formel 1-5) zusammen:

$$t_{AV\_ges} = t_{Vorb\_ges} + t_{MP\_ges} + t_{Gen\_ges} + t_{Input\_ges} + t_{Check\_ges}$$

#### Formel 6: Zeitlicher Gesamt-Aufwand der Arbeitsvorbereitung

Der zeitliche Gesamt-Aufwand der Arbeitsvorbereitung zur Durchführung der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme gilt in der vorliegenden Arbeit als Zielgröße und wird durch Reduktion sowie Elimination einzelner Zeiterme optimiert. Dazu folgt in Abschnitt 5.2 eine Diskussion zur Automatisierung einzelner Schritte des aktuellen Prozesses der Informationsversorgung, sodass durch Teilung von Aufgaben (Funktionsallokation) zwischen Mensch und Maschine menschliche Aufwände gesenkt und AV-Mitarbeitende damit direkt entlastet werden.

## 4.2 Ableitung der Anforderungen

Nachdem der aktuelle Stand des Informationsversorgungsprozesses visueller Werkerführungssysteme analysiert wurde, werden anschließend die gestellten Anforderungen zur Umsetzung des Vorgehensmodells definiert. Zur Durchführung der Anforderungsanalyse wird die von ROBERTSON und ROBERTSON entwickelte Vorgehensweise zur Erstellung eines Anforderungsprofils herangezogen (vgl. Robertson und Robertson 2013). Dabei gilt es folgende Arten von Anforderungen zu unterscheiden:

**Geschäftsanforderung:** Geschäftsanforderungen beschreiben, warum ein Unternehmen ein System implementiert und stellt damit den Geschäftsnutzen dar,

welchen das Unternehmen durch Anwendung des zu entwickelnden Artefakts erreichen möchte.

**Systemanforderung:** Beschreiben Anforderungen an ein Produkt, welches aus mehreren Komponenten oder Subsystemen besteht und schließt Hardware, Software sowie die mit diesen Systemen agierenden Menschen ein.

**Benutzeranforderung:** Benutzeranforderungen beschreiben Ziele oder Aufgaben, welche Benutzer unter Anwendung des zu entwickelnden Produkts als erfüllt sehen müssen. Dies umfasst auch Beschreibungen von Produktattributen oder Merkmalen, welche für die Benutzerzufriedenheit wichtig sind.

**Funktionale Anforderung:** Funktionale Anforderungen spezifizieren das Verhalten, welche das Produkt unter bestimmten Bedingungen aufweisen wird. Sie beschreiben, was Software-Entwickler zu implementieren haben, damit die Benutzer ihre Aufgaben (Benutzeranforderungen) ausführen und damit die Geschäftsanforderungen erfüllen.

Nachfolgend werden Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell definiert und näher beschrieben. Diese werden aus der Zielsetzung der Arbeit sowie dem in Abschnitt 4.1 analysierten Informationsversorgungsprozess abgeleitet und durch Literaturrecherche, Interviews in durchgeführten Forschungsprojekten (MMAssist II (vgl. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) 2021a) und TAI-VW (vgl. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) 2021b)) sowie Experteninterviews mit potenziellen Anwendern gestützt.

**Anforderung 1 – Gängige Informationsausgabearten in Montageprozessen unterstützen (Benutzeranforderung):** Die zu erstellenden Werkerinformationen decken die in Montageprozessen auftretenden Informationsbedürfnisse der Werker ab und es sind gängige Informationsausgabearten (siehe Abschnitt 2.2.3) wie beispielsweise textuelle Beschreibungen, Bilder und Animationen erstellbar. Zusätzlich soll das zu entwickelnde Vorgehensmodell ebenso einen Prozess für eine automatisierte Erstellung von Werkerinformationen für AR/VR/MR Systeme möglich machen und Vorschläge liefern, wie eine Erstellung sowie Eintragung von realen Werkerinformationen (zum Beispiel Foto- oder Videoaufnahmen) zumindest erleichtert wird.

**Anforderung 2 – Bestehendes Wissen wiederverwenden (Funktionale Anforderung):** Um zeitliche Aufwände bei der Eingabe von Informationen niedrig zu halten, soll das zu entwickelnde Artefakt bei der automatischen Ableitung von Werkeranweisungen auf bestehendes Wissen zurückgreifen. Das digitale

Produktmodell der zu montierenden Produktvariante beinhaltet geometrische und strukturelle Informationen, Besonderheiten einzelner Komponenten sowie Materialparameter und soll als Eingabeinformation zur Erstellung der Werkeranweisungen genutzt werden (vgl. Kardos et al. 2018). Weiters soll Prozesswissen aus früher geplanten Produktvarianten wiederverwendet werden, um den Planungsaufwand je Produktvariante gering zu halten (vgl. Rulhoff et al. 2013). Daten der verfügbaren Ressourcen wie beispielsweise Werkzeuge oder Mess- & Prüfmittel werden vom zu entwickelnden Artefakt ebenso einbezogen.

**Anforderung 3 – Fehlendes Wissen soll über Benutzerschnittstellen in den Erstellungsprozess einzubringen sein (Benutzeranforderung):** Das zu entwickelnde Artefakt soll Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung im Informationsversorgungsprozess unterstützen, Routineaufgaben übernehmen und die Eingabe fehlenden Wissens unterstützen (vgl. Li et al. 2018).

**Anforderung 4 – Anpassung der zu erstellenden Informationen hinsichtlich der Erfahrung des Informationskonsumenten (Funktionale Anforderung):** Das zu entwickelnde Softwareartefakt soll eine hohe Anpassungsfähigkeit (Adaptivität) hinsichtlich der Erfahrung der Informationskonsumenten aufweisen. Individualisierte Werkeranweisungen ermöglichen eine an den Informationskonsumenten angepasste Vermittlung von Informationen zur Unterstützung im Montageprozess (vgl. Hinrichsen et al. 2018). Die Erstellung von Werkerinformationen soll in Abhängigkeit der Erfahrung des Montagemitarbeiters ermöglicht werden und in Anfänger, Fortgeschrittene und Experten unterschiedlichen werden (vgl. Müller et al. 2018b).

**Anforderung 5 – Anpassung der zu erstellenden Informationen auf gewünschtes Ausgabegerät und Darstellungsform (Funktionale Anforderung):** Das zu entwickelnde Softwareartefakt soll eine hohe Anpassungsfähigkeit (Adaptivität) hinsichtlich möglicher Ausgabeformen aufweisen. Auszugebende Informationen sind kontextabhängig zu erstellen. Dabei soll neben der Erfahrung des Informationskonsumenten ebenso die gewünschte Sprache, zu nutzendes Ausgabegerät und Darstellungsform einfließen (vgl. Nikolenko et al. 2020). Herausforderungen bzgl. Lesbarkeit von Informationen bei unterschiedlichen Geräten und Bildschirmauflösungen sind zu adressieren (vgl. Bhattacharya und Winer 2015).

**Anforderung 6 – Hohe Qualität der erstellten Werkerinformationen (Benutzeranforderung):** Ziel des zu entwickelnden Artefakts ist eine automatisierte Erstellung und Einspeisung von Werkerinformationen. Die Effektivität des Artefakts ist somit unter anderem über die Qualität der automatisiert generierten Informationen zu

beurteilen. Werkeranleitungen müssen Montagemitarbeitende kognitiv unterstützen (vgl. Dollinger C., Lock C., Reinhart G. 2016) und einfach und unmissverständlich zu interpretieren sein. Trotz Steigerung des Automatisierungsgrades haben Planungsmitarbeitende die Möglichkeit, erstellte Werkerinformationen zu prüfen und zu bearbeiten, bevor diese Montagemitarbeitenden am Shop Floor zur Verfügung gestellt werden (vgl. Kardos et al. 2018).

### 4.3 Kritische Reflexion und Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die in Abschnitt 3.3 formulierte Zielsetzung dieser Arbeit erreicht werden soll. Dies deckt damit die zweite Phase des DSRM-Nominalprozesses ab.

Dabei wurde zunächst der aktuelle Prozess zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme analysiert und die einzelnen Aktivitäten detailliert beschrieben. Grundlage dafür waren Literaturrecherchen und Interviews mit potenziellen Anwendern sowie Herstellern von Werkerführungssystemen. Der analysierte Informationsversorgungsprozess wird in drei Abschnitte unterteilt:

- Montageplanung durchführen: Vorgabe der Montagereihenfolge, der zu verwendenden Werkzeuge und Hilfsmittel
- Werkerinstruktionen erstellen: Verfassen von Anweisungstexten, Erstellung von Bildern und Videos
- Werkerinstruktionen eintragen: Aufbereitete Werkerinformationen in die Datenbank beziehungsweise Speichermedien des zu verwendenden visuellen Werkerführungssystems eintragen

Als anwendende beziehungsweise ausführende Akteure des Informationsversorgungsprozess werden Mitarbeitende der Arbeitsvorbereitung definiert, wobei sich diese Rollenzuordnung in industriellen Unternehmen anders darstellen kann und vereinzelt von Mitarbeitenden des Industrial Engineerings, der Produktions- oder Montageplanung übernommen wird. Der analysierte Informationsversorgungsprozess wurde als UML 1.0 Aktivitätsdiagramm dargestellt und erforderliche zeitliche Aufwände der einzelnen Teilschritte wurden vermerkt. Dies ermöglicht es, den derzeitigen Ist-Stand in produzierenden Unternehmen abzubilden und Einflussgrößen auf die erforderlichen zeitlichen Aufwände zu identifizieren. Es folgte eine quantitative Beschreibung ebendieser manuellen Aufwände der einzelnen Aktivitäten durch ein mathematisches Modell. Abschließend werden die Anforderungen an das Vorgehensmodell erarbeitet welche in nachfolgender Übersichtstabelle zusammengefasst werden:

Tabelle 3: Zusammenfassende Darstellung der Anforderungen

<b>Anforderungen an das Vorgehensmodell</b>		
<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung der Anforderung</b>	<b>Anforderungsart</b>
1	Gängige Informationsausgabearten in Montageprozessen unterstützen	Benutzeranforderung
2	Bestehendes Wissen wiederverwenden	Funktionale Anforderung
3	Fehlendes Wissen ist über Benutzerschnittstellen in den Erstellungsprozess einzubringen	Benutzeranforderung
4	Anpassung der zu erstellenden Informationen hinsichtlich der Erfahrung des Informationskonsumenten	Funktionale Anforderung
5	Anpassung der zu erstellenden Informationen auf gewünschtes Ausgabegerät und Darstellungsform	Funktionale Anforderung
6	Hohe Qualität der erstellten Werkerinformationen	Benutzeranforderung

Tabelle 3 stellt alle Anforderungen an das Vorgehensmodell übersichtlich dar und ermöglicht weiters eine Nummerierung, um eine spätere Validierung der Anforderungen zu vereinfachen. Diese Anforderungsliste dient als Grundlage für die nachfolgende Konzeption des Vorgehensmodells sowie der Formulierung von Prozess- und Informationsmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme.

## 5 Entwicklung des Vorgehensmodells

Die dritte Phase des DSRM-Nominalprozesses „Design und Entwicklung“ umfasst die Entwicklung des Artefakts (Vorgehensmodell) und es erfolgt eine Beschreibung seiner Funktionalität und Architektur unter Einbezug bestehenden theoretischen Wissens (vgl. Peffers et al. 2007). Somit wird basierend auf den in Kapitel 2 dargestellten theoretischen Grundlagen, des in Kapitel 3 erarbeiteten Stands der Forschung sowie der abgeleiteten Anforderungen aus Kapitel 4 im vorliegenden Kapitel 5 ein Vorgehensmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme entwickelt.

Einzelne Teile dieses Kapitels wurden vom Autor bereits in früheren Publikationen veröffentlicht und die dabei publizierten Sachverhalte sind in der vorliegenden Arbeit aus Gründen der Vollständigkeit übernommen worden oder wurden um neue Erkenntnisse erweitert. Dies betrifft folgende Veröffentlichungen:

- „A Concept towards Automated Data-Driven Reconfiguration of Digital Assistance Systems“; Reisinger, G.; Komenda, T.; Hold, P.; Sihn, W.; Conference of Learning Factories 2018, 2018 (vgl. Reisinger et al. 2018)
- „Automated Information Supply of Worker Guidance Systems in Smart Assembly Environment“; Reisinger, G.; Hold, P.; Sihn, W.; 9th International Precision Assembly Seminar, 2020 (vgl. Reisinger et al. 2020)

### 5.1 Konzeption des Vorgehensmodells

Die Konzeption des Vorgehensmodells erfolgt durch eine schrittweise Konstruktion aus einzelnen Teilelementen, welche nachfolgend dargestellt wird. Dabei dient der analysierte Ist-Prozess zur manuellen Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme als Grundlage (siehe Abschnitt 4.1). Die abgeleiteten Anforderungen aus Abschnitt 4.2 dienen im vorliegenden Kapitel 5 als Leitlinie für die Entwicklung des Vorgehensmodells zur Automatisierung des Informationsversorgungsprozesses visueller Werkerführungssysteme und es erfolgt weiters eine detaillierte Darstellung der einzelnen Prozesse, Algorithmen und Standardisierungsansätze, welche darin verwendet werden. Nachfolgende Abbildung 15 stellt übersichtlich den Entstehungsprozess des Vorgehensmodells dar, welches aus Prozess- (D) und Informationsmodell (E) besteht, auf den nachfolgend identifizierten Automatisierungspotenzialen (C) aufbauen und in welches die zuvor erarbeiteten Teil-Ergebnisse Manueller (Informationsversorgungs-)Prozess (A) und Mathematisches Modell (B) einfließen:

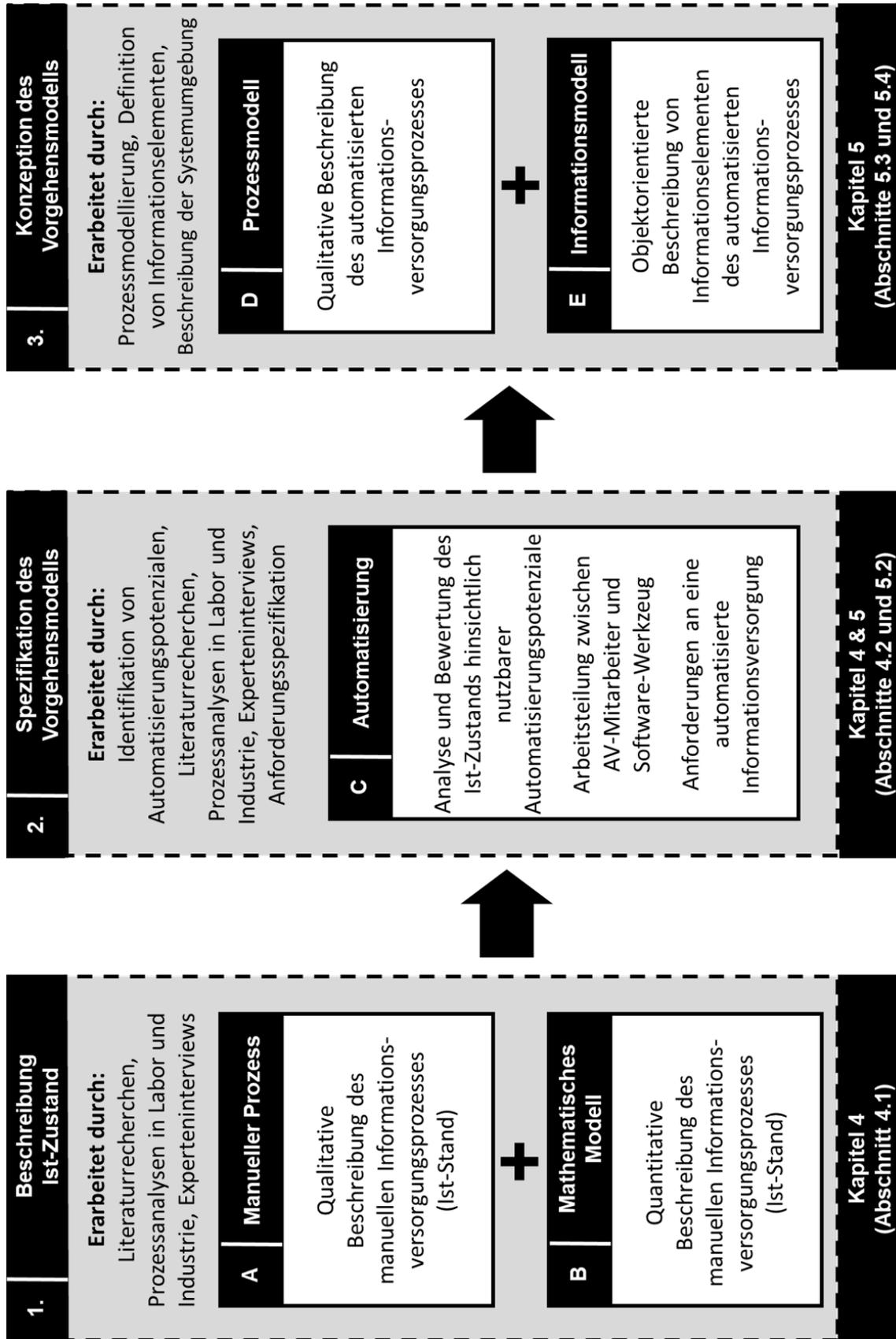


Abbildung 15: Entstehung und Aufbau des Vorgehensmodells sowie darin einfließende Teil-Ergebnisse

Nachfolgend wird die Entstehung des Vorgehensmodells und darin einfließende Teilergebnisse dargelegt:

Die Beschreibung des Ist-Zustands (1) erfolgte in Kapitel 4 und setzt sich aus dem analysierten manuellen Prozess (A, Abschnitt 4.1) sowie dem mathematischen Modell (B, Abschnitt 4.1) zusammen. Während der manuelle Prozess eine qualitative Beschreibung des manuellen Informationsversorgungsprozesses darstellt, dient das mathematische Modell zur quantitativen Beschreibung der einzelnen Zeiterme im manuellen Prozess. Beide Teilergebnisse wurden durch Literaturrecherchen, Prozessanalysen in Labor und in industriellen Betrieben sowie durch Experteninterviews erarbeitet.

Die Spezifikation des Vorgehensmodells (2) basiert auf den in Abschnitt 4.2 abgeleiteten Anforderungen, Identifikation von Automatisierungspotenzialen, Literaturrecherchen, Prozessanalysen in Labor und Industrie sowie durch Experteninterviews mit potenziellen Anwendern. Die Automatisierungspotenziale (C) werden im nachfolgenden Abschnitt 5.2 identifiziert und näher beschrieben.

Die Konzeption des Vorgehensmodells (3) erfolgte durch Prozessmodellierung sowie Definition einzelner Informationselemente. Das Vorgehensmodell setzt sich zusammen aus den Teilartefakten Prozessmodell (D, Abschnitt 5.3), welches den schrittweisen Ablauf im Vorgehensmodell beschreibt, sowie Informationsmodell (E, Abschnitt 5.4), welches die dabei verarbeiteten Informationen und Daten definiert. Beide Teilartefakte zusammen ergeben das Vorgehensmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme.

Nachfolgend wird das Vorgehensmodell auf Marko-Ebene konzeptioniert. Dieses besteht aus sechs grundlegenden Schritten, welche zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme durchlaufen werden. Im Gegensatz zum Vorgehensmodell, beschreibt das darin enthaltene Prozessmodell die einzelnen, für eine automatisierte Verarbeitung, erforderlichen Teilschritte und ist somit eine Detailebene tiefer verortet. Das Vorgehensmodell startet zum Zeitpunkt der Annahme eines Planungsauftrags und endet mit einer abgeschlossenen Prüfung und Freigabe der automatisch erstellten Werkerinformationen.

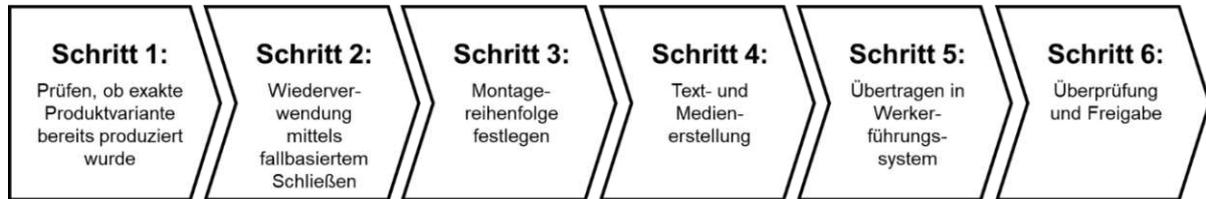


Abbildung 16: Konzept des Vorgehensmodells mit sechs Schritten

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte des Vorgehensmodells erläutert, wobei eine detaillierte Darstellung der Teilvorgänge in der Formulierung des Prozessmodells in Abschnitt 5.3 gegeben wird.

### Schritt 1: Prüfen, ob exakte Produktvariante bereits produziert wurde

Zunächst erfolgt automatisiert eine Prüfung, ob exakt die aktuell zu planende Produktvariante bereits produziert wurde und Werkerinformationen bereits vorliegen. Dazu erfolgt ein direkter Abgleich der Produktvariantenkennung (z.B. Produktbezeichnung). Ist dies der Fall, so können alle weiteren Schritte des Vorgehensmodells übersprungen werden und direkt die in der Vergangenheit erzeugten Werkerinformationen herangezogen werden. Voraussetzung dafür ist, dass während dieses Suchvorgangs auch geprüft wird, ob die vorliegenden Anleitungen für die zu produzierende Produktvariante noch aktuell sind. Dies erfordert eine manuelle Prüfung und ein Vorhandensein entsprechender Informationen.

### Schritt 2: Wiederverwendung mittels fallbasiertem Schließen

Die zu planende Produktvariante wird analysiert, indem 3D-CAD-Daten oder Stücklistendaten automatisiert verarbeitet und Charakteristiken wie Bezeichnungen, Abmessungen oder Materialien extrahiert und in einer Datenbank gespeichert werden. Anschließend erfolgt mittels fallbasiertem Schließen eine Suche nach ähnlichen Produktvarianten, welche bereits in der Vergangenheit produziert und geplant wurden. Im Erfolgsfall werden die in der früheren Produktvariante erzeugten Werkerinformationen wiederverwendet und automatisiert angepasst. Abschnitt 2.3.2 legt die Grundlagen des fallbasierten Schließens dar, während in Abschnitt 5.3 der entwickelte Algorithmus zur automatisierten Ableitung von Montageplänen beschrieben wird.

### Schritt 3: Montagereihenfolge festlegen

Die Reihenfolge des anzuleitenden Montageprozesses wird festgelegt, indem einzelne Montageschritte definiert werden und die dabei zu verbauenden Bauteile, Baugruppen, Werkzeuge und Hilfsmittel festgelegt werden. Dazu ist umfangreiches Wissen über

das Produkt, den Prozess sowie die zu verwendenden Ressourcen seitens der Planungsmitarbeitenden in das System einzubringen.

#### **Schritt 4: Text- und Medienerstellung**

Ausgehend von den in Schritt 3 eingegebenen Informationen und unter Berücksichtigung der bereits vorliegenden Produktdaten wie 3D-CAD-Modell, Stücklisteninformationen und Geometrien werden automatisiert einzelne Texte und Medien erstellt. Dies umfasst Beschreibungstexte, Bauteilbezeichnungen, Werkzeugbezeichnungen, Fotos, Screenshots, Videos, Animationen und Prozessparameter bspw. für Werkzeuge.

#### **Schritt 5: Übertragen in Werkerführungssystem**

Die erstellten Werkerinformationen wie Texte und Medien werden über eine Schnittstelle in das gewünschte Werkerführungssystem automatisiert übertragen. Hierzu ist ein Mapping zwischen den vorliegenden erstellten Werkerinformationen und der Datenbank bzw. Speichermedien des Werkerführungssystem erforderlich.

#### **Schritt 6: Überprüfung und Freigabe**

Um eine qualitätsgetreue Ausgabe der Werkerinformationen über das visuelle Werkerführungssystem zu ermöglichen, erfolgt im letzten Schritt eine manuelle Überprüfung und Freigabe. Sollten Fehler oder Anpassungen identifiziert werden, können diese umgehend korrigiert werden.

Das Vorgehensmodell setzt sich aus Prozess- und Informationsmodell zusammen. Während das Prozessmodell den detaillierten Ablauf der zuvor beschriebenen sechs Schritten des Vorgehensmodells beschreibt, definiert das Informationsmodell alle Informationen sowie Objektklassen, welche im Prozessmodell verarbeitet und transformiert werden. Beide Modelle werden nach der Identifizierung der Automatisierungspotenziale in den Abschnitten 5.3 und 5.4 im Detail formuliert und beschrieben.

## 5.2 Identifizierung von Automatisierungspotenzialen im analysierten Informationsversorgungsprozess

Nachfolgend werden einzelne Automatisierungspotenziale im analysierten Informationsversorgungsprozess identifiziert. Dabei werden angeführte Tätigkeiten im Ist-Informationsversorgungs-Prozess (Abschnitt 4.1) untersucht, ob und in welcher Ausprägung Automatisierung möglich ist. Dabei wird folgende Herangehensweise verfolgt: Anwendung von Automatisierung wo möglich (Eliminierung von menschlichen Schwächen und Defiziten) und Vereinfachung von Teilschritten anbieten wo nötig und sinnvoll (Unterstützung menschlicher Stärken durch Hilfsfunktionen).

Folgende Tätigkeiten des in Abschnitt 4.1 definierten aktuellen Prozesses der Informationsversorgung sind vollständig automatisierbar und ihre Automatisierungsmöglichkeiten werden nachfolgend näher erläutert:

- Prüfen, ob Produktvariante bereits produziert wurde
- Datensatz der zu produzierenden Produktvariante im visuellen Werkerführungssystem suchen & auswählen
- Texte nach definierten Regeln verfassen (Textbausteine)
- Virtuell statische Medien erstellen (Screenshots)
- Virtuell dynamische Medien erstellen (Animationen)
- AR-Teilmodelle erstellen
- Eingabe der erstellten Daten in visuelles Werkerführungssystem

Prüfen, ob Produktvariante bereits produziert wurde: Eine Prüfung, ob die aktuell zu planende Produktvariante bereits produziert wurde und Werkerinstruktionen für das gewünschte visuelle Werkerführungssystem bereits vorliegen, erfolgt automatisiert nach zuvor festgelegten Regeln: Dazu werden Produktdaten wie bspw. Modell, Produktnummer oder Bezeichnungen der aktuell zu planenden Produktvariante mit historischen Produktionsdaten abgeglichen. Im Falle einer direkten Übereinstimmung von bspw. der Produktvariantennummer zwischen historischen Produktionsdaten und aktuell zu planender Produktvariante, ergibt dieser Prüfungsschritt ein positives Ergebnis.

Datensatz der zu produzierenden Produktvariante im visuellen Werkerführungssystem suchen & auswählen: Sofern vorhergehende Prüfung ein positives Ergebnis ergibt, erfolgt ebenso die Suche des variantenbezogenen Datensatzes sowie eine Einspielung dieses Datensatzes in die Datenbank des visuellen Werkerführungssystems vollständig automatisiert. Voraussetzung dafür ist, dass diese historischen

Produktionsdaten verfügbar sind und ebenso auf die Datensätze der Anleitungen zur Produktvariante zugegriffen werden kann.

Texte nach definierten Regeln verfassen (Textbausteine): Die Generierung von Anweisungstexten für einzelne Montageschritte ist – manuell ausgeführt – eine zeitaufwändige Tätigkeit und führt insbesondere bei mehrsprachigen Texten zur Problematik, dass AV-Mitarbeiter unterschiedliche Sprachkenntnisse aufzuweisen haben, um mehrsprachige Texte zu erstellen. Eine Automatisierung dieser Tätigkeit ist vorzuziehen und durch einfache, regelbasierte Textvorlagen besteht zusätzlich das Potenzial, Anweisungstexte ohne manuellen Mehraufwand in sämtlichen relevanten Sprachen abzuleiten. In Abhängigkeit der durchzuführenden Tätigkeit stehen mehrere Textvorlagen mit Platzhaltern zur Verfügung und diese werden bei der Generierung der Texte mit korrekten Werten der aktuell zu planenden Produktvariante (z.B. Bauteil-Bezeichnungen, Farben, Drehmomente, Werkzeugnamen etc.) befüllt.

Virtuell statische Medien erstellen (Screenshots), virtuell dynamische Medien erstellen (Animationen) sowie AR-Teilmodelle erstellen: Eine Ableitung von virtuellen Werkerinformationen, sowohl statischer (Screenshot) als auch dynamischer Ausprägung (Animation), sowie von AR-Teilmodellen ist durch graphisches Rendering automatisierbar. Zum Zeitpunkt der Generierung sind relevante Bauteile als 3D-Modell innerhalb einer 3D-Umgebung automatisiert zu laden und zu platzieren, sodass Bilder (Screenshots) und Fügeanimationen abgeleitet werden können. Erforderlich sind dafür jedoch virtuelle 3D-CAD Produktmodelle, Informationen über relevante Bauteile und Komponenten des aktuellen Montageschritts sowie Perspektive und Zoom-Weite des zu erstellenden Mediums. All diese Informationen werden zuvor von Mitarbeitenden der AV im Zuge des Authoring-Prozessschritts eingegeben, oder liegen bereits in den Produktdaten vor.

Eingabe der erstellten Daten in visuelles Werkerführungssystem: Die in vielen Unternehmen nach wie vor manuell durchgeführte Tätigkeit der Eingabe in das visuelle Werkerführungssystem ist bei Kenntnis der Datenstruktur der Eingangs- sowie Ausgangsinformationen automatisierbar. Dabei sind Eingangsinformationen in das Format des gewünschten Werkerführungssystems zu übersetzen, sodass daraus entstehende Ausgangsinformationen automatisiert per Zugriff in das Datensystem der visuellen Werkerführung eingetragen (geschrieben) werden. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass entweder direkt auf die Datenbasis des gewünschten visuellen Werkerführungssystem zugegriffen werden kann (z.B. Datenbankzugriff oder Dateispeicherzugriff), oder eine softwarebasierte Schnittstelle zum Austausch dieser Daten zur Verfügung steht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass wesentliche, zeitlich aufwändige Arbeitsschritte im zuvor analysierten Informationsversorgungsprozess automatisierbar sind, indem durch einfache Regeln, Vereinfachung, Standardisierung und durch das Vorhandensein einer verlässlichen und umfangreichen Datenbasis eine automatisierte Durchführung ermöglicht wird.

Nachfolgende Tätigkeiten des analysierten aktuellen Prozesses der Informationsversorgung werden nicht vollständig automatisiert und werden auch im zu entwickelnden Vorgehensmodell manuell von Mitarbeitenden durchgeführt. Diese sollten jedoch bei der Ausführung durch die Darbietung von Assistenzfunktionen unterstützt werden:

- Montagereihenfolge festlegen
- Hilfsmittel & Parameter angeben
- Reale statische Medien erstellen (Fotos)
- Reale dynamische Medien erstellen (Videos)
- Prüfen, ob alle Werkerinformationen korrekt sind
- Werkerinformationen freigeben

Montagereihenfolge festlegen: Die Durchführung der Montageplanung, welche die Vorgabe der Montagereihenfolge sowie die Angabe von Hilfsmitteln und Parametern je Schritt beinhaltet, ist schwer zu automatisieren und wird somit von einem erfahrenen AV-Mitarbeiter durchgeführt. Dieser wird dabei durch eine Assistenzfunktion unterstützt, sodass eine Vorgabe der Montagereihenfolge einfach möglich und benutzerfreundlich ausgestaltet ist.

Hilfsmittel & Parameter angeben: Bei der Eingabe von Hilfsmitteln und Parametern wird Assistenz in Form von Vorschlägen angeboten, indem beispielsweise Werkzeuge und Schraubparameter auf Grund definierter Regeln vorgeschlagen und damit manuelle Aufwände reduziert werden. Beispielsweise enthalten Schraubmomenttabellen sämtliche Informationen, um ideale Schraubmomente in Abhängigkeit der zu verschraubenden Bauteilpaarung, deren Werkstoffen sowie Schraubendimensionen.

Reale statische Medien erstellen (Fotos) sowie reale dynamische Medien erstellen (Videos): Eine Erstellung von realen statischen (Fotos) sowie dynamischen Medien (Videos) ist nur unter erheblichem Aufwand automatisierbar. Virtuelle statische Medien (Screenshots) und dynamische Medien (Animationen) werden hingegen automatisiert abgeleitet und sind zu bevorzugen. Sofern eine Ableitung von realen Medien dennoch erforderlich ist, empfiehlt sich die Darbietung einer Assistenz, beispielsweise in Form

einer Applikation auf einem mobilen Gerät (Tablet oder Smartphone), sodass Teilschritte automatisiert werden: Während eine Erstellung der realen Medien selbst von Mitarbeitenden ausgeführt wird, erfolgt die Übertragung in eine zentrale Datenbank sowie Nachbearbeitung automatisiert.

Prüfen, ob alle Werkerinformationen korrekt sind und Werkerinformationen freigeben: Prüfung und Freigabe der erstellten Werkerinformationen erfordert ausgeprägte Erfahrung und menschliche Intuition, sodass eine Automatisierung dieser Tätigkeit aus heutiger Sicht nicht sinnvoll erscheint. Dennoch sind Mitarbeitende, welche Prüfung und Freigabe verantworten, durch das System zu assistieren, indem beispielsweise zu prüfende Werkerinformationen übersichtlich und kompakt aufbereitet werden und Änderungen mit wenig Aufwand durchführbar sind. Hieraus leitet sich ein Bedarf nach einer hohen Benutzerfreundlichkeit ab.

### 5.3 Formulierung des Prozessmodells

Ausgehend vom in Abschnitt 4.1 analysierten manuellen Informationsversorgungsprozesses, dessen formulierter mathematischer Modellierung sowie dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Konzept der Automatisierung wird nachfolgend das Prozessmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme entwickelt und näher beschrieben. Analog zum manuellen Informationsversorgungsprozess aus Abschnitt 4.1 wird zunächst eine Gesamtübersicht des Prozessmodells als UML 1.0 Aktivitätsdiagramm dargestellt und einzelne Prozessschritte werden erläutert. Anschließend erfolgt eine eingehendere Darstellung konzeptionierter Algorithmen und Heuristiken sowie eines selbstlernenden Expertensystems.

### Darstellung als Prozessmodell

### Schritte im Vorgehensmodell

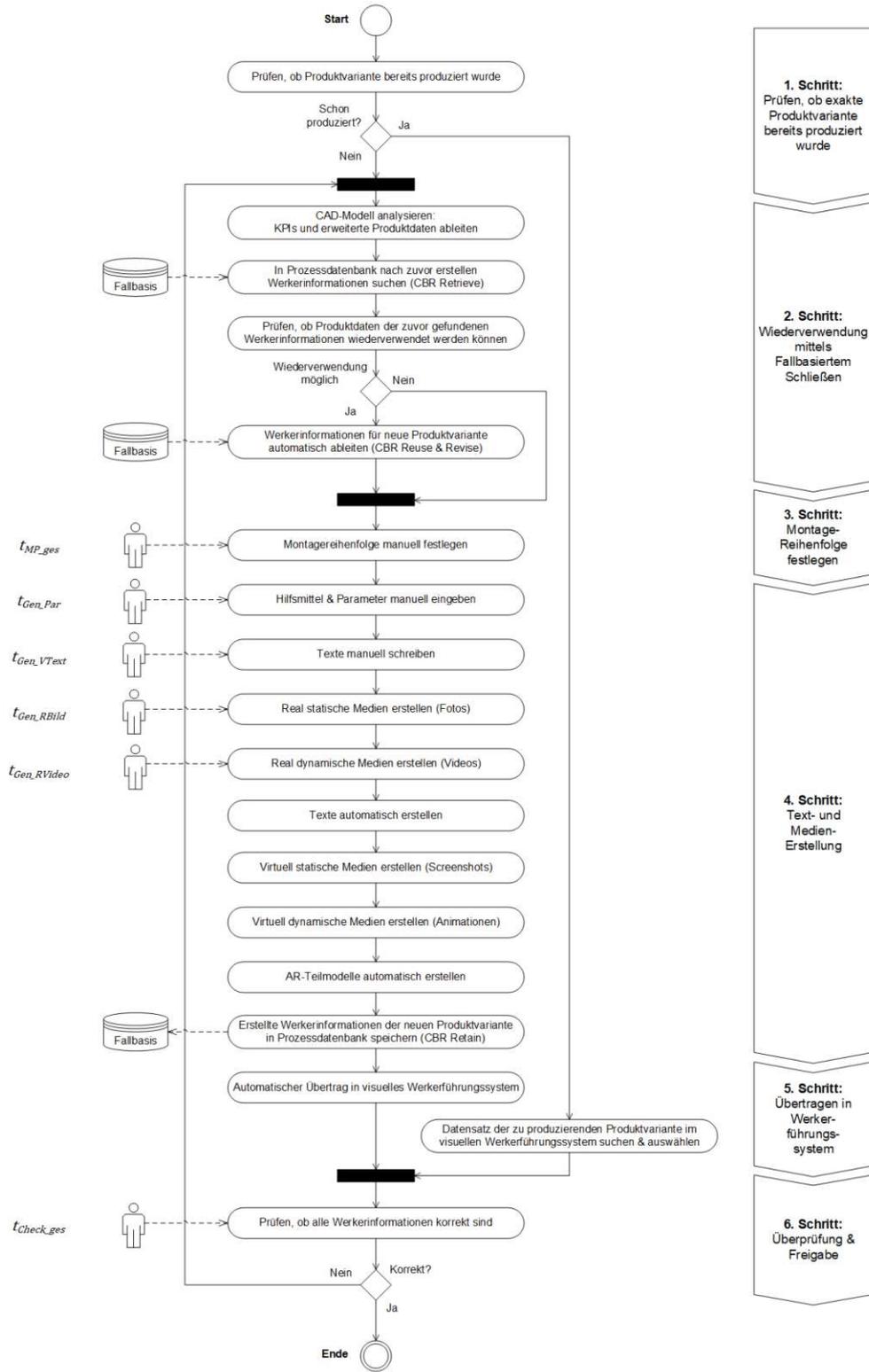


Abbildung 17: Entwickeltes Prozessmodell zur automatisierten Informationsversorgung und Zuordnung zu Vorgehensmodell (UML 1.0 Aktivitätsdiagramm)

In Abbildung 17 ist das entwickelte Prozessmodell als UML 1.0 Aktivitätsdiagramm dargestellt. Analog zur Darstellung des manuellen Informationsversorgungsprozess in Abschnitt 4.1 wird auf der linken Seite durch ein Mensch-Symbol dargestellt, welche Aktivitäten weiterhin manuell von AV-Mitarbeitenden durchzuführen sind und welche zeitlichen Aufwände  $t_x$  dafür anfallen. Aktivitäten, welche kein Menschensymbol aufweisen, werden vollständig automatisiert von Algorithmen übernommen und erfordern somit Rechenleistung, jedoch keine menschlichen beziehungsweise manuellen zeitlichen Aufwände.

In den nachfolgenden Abschnitten von Kapitel 5.3 werden einzelne Prozessabläufe und Funktionsweisen des zu entwickelnden Prozessmodells näher beschrieben und es wird ausgeführt, wie die in Abschnitt 5.2 identifizierten Automatisierungspotenziale umgesetzt werden. Dabei wird auf die in Abschnitt 4.1 dargestellte Aufteilung des Informationsversorgungsprozesses in drei Tätigkeitsblöcke Bezug genommen und eine detaillierte Ausgestaltung der Algorithmen, Heuristiken und Methoden wird entsprechend dargestellt:

- Montageplanung durchführen
- Werkerinstruktionen erstellen
- Werkerinstruktionen eintragen

Als Startpunkt des dargestellten Prozessmodells dient analog zum manuellen Informationsversorgungsprozess die Annahme eines Planungsauftrags durch einen AV-Mitarbeitenden, während als Endpunkt die abgeschlossene Freigabe zur nachfolgenden Verwendung der erstellten Werkerinformationen definiert wird.

Sollte die zu planende Produktvariante schon einmal montiert worden sein und die entsprechenden Datensätze für die visuelle Werkerführung noch vorhanden sein, sind diese nicht neu zu erstellen. Voraussetzung dafür ist, dass die vorliegenden Datensätze der Anleitung aktuell sind, beispielsweise über einen Vergleich der Indizes sowie Revisionen der einzelnen Baugruppen. Eine Durchführung der Suche beziehungsweise Prüfung, ob diese Variante bereits produziert wurde, erfolgt im entwickelten Prozessmodell automatisiert über die Produktvariantenbezeichnung. Im Falle einer Existenz der Datensätze werden diese ausgewählt und bei Bedarf erneut der visuellen Werkerführung inkl. eines neuen Montageauftrags zur Verfügung gestellt. Im Falle einer neuen Produktvariante, welche zuvor in exakt dieser Ausprägung noch nicht produziert beziehungsweise geplant wurde, wird der Vorbereitungsprozess für die Informationsversorgung angestoßen.

Die Durchführung der Montageplanung ist ein Teil der Informationserstellung, welche wiederum einen Teil der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme darstellt und umfasst das Festlegen der Montageschritte und der Montagereihenfolge, das Hinzufügen fehlender Informationen sowie eine Definition und Parametrisierung zu verwendender Hilfsmittel und Werkzeuge (vgl. Reisinger et al. 2020). Während ein großer Teil der im analysierten Informationsversorgungsprozess (Abschnitt 4.1) noch manuell durchzuführenden Prozessschritte durch Anwendung des entwickelten Prozessmodells automatisiert übernommen werden, ist die Montagefeinplanung eine Tätigkeit, welche sich durch eine hohe Komplexität auszeichnet und ausgeprägtes Wissen über die Montageumgebung, die Definition einer kollisionsfreien Montagereihenfolge, Hilfsmittel- und Werkzeugauswahl sowie Optimierung von Bewegungsabläufen erfordert (vgl. Hu et al. 2011). Dies führt dazu, dass die Durchführung der Montagefeinplanung weiterhin einem menschlichen Experten obliegt, dieser aber durch eine möglichst einfach anzuwendende Eingabeoberfläche und durch Automatisierung von kleineren Teilaufgaben zu unterstützen ist. Folgende Wissensarten sind bei der Montagefeinplanung zu erheben und in Zusammenhang zu bringen (vgl. Reisinger et al. 2020):

- Produktbeschreibendes Wissen wird aus vorliegenden virtuellen Produktmodellen (zum Beispiel 3D-CAD-Modell) abgeleitet und enthält Informationen über Geometrien, Produktstruktur, erforderliche Sonderoperationen bei der Montage von Bauteilen (zum Beispiel Ölen, Fetten, Reinigen) und Ausprägungen von Produktoptionen (zum Beispiel Farben). Zusätzliche Daten werden aus externen Wissensquellen wie Product Lifecycle Management (PLM) oder Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen übernommen.
- Prozessbezogenes Wissen wird von einem AV-Mitarbeiter mit Hilfe eines Authoring-Tools manuell eingegeben. Dieser bringt dabei seine Erfahrungen bezüglich einer optimalen Arbeitsreihenfolge sowie erforderlicher Zwischenschritte ein und prüft, ob der Montageprozess kollisionsfrei durchführbar ist.
- Ressourcenbezogenes Wissen wird vom AV-Mitarbeiter mit Hilfe eines Authoring-Tools manuell bereitgestellt und umfasst Wissen über Werkzeuge, Hilfsmittel, Messgeräte sowie eine geeignete Arbeitsmethode zur Anwendung dieser Mittel.

Bei der Eingabe der einzelnen Wissens Elemente wird der AV-Mitarbeiter durch eine möglichst einfach anzuwendende Eingabeoberfläche unterstützt, sodass ein Montageplan beispielsweise nicht in Form einer Tabelle festgelegt wird, sondern über

die Vorgabe der Montagereihenfolge durch Auswählen einzelner Bauteile innerhalb der 3D-CAD-Umgebung schrittweise angelegt wird. Je Montageschritt werden zusätzliche Informationen eingegeben, beispielsweise fehlende Bauteile, Hinweise auf potenzielle Ausführungsfehler, Greifweiten am Montagearbeitsplatz oder Parameter für intelligente Werkzeuge (z.B. für intelligente und vernetzte Schraubwerkzeuge). Dabei werden einzelne Zusammenhänge erkannt und automatisiert Eingabevorschläge angeboten, zum Beispiel Erkennung eines Schraubprozesses auf Grund ausgewählter Bauteile wie Schrauben und Muttern und ein daraus abgeleiteter Vorschlag des aufzubringenden Schraubmoments sowie der Einschraubtiefe.

### **Wiederverwendung von Prozessschritten mittels Fallbasiertem Schließen:**

Eine abschließende automatische Ableitung des Montageplans für die neue Produktvariante erfolgt auf Grund von ähnlichen früheren Produktvarianten automatisiert und durch ein selbstlernendes Expertensystem. Dazu wird die Methode **„Fallbasiertes Schließen“ bzw. „Case-Based Reasoning“** eingesetzt und der AV-Mitarbeiter bei der Durchführung der Montageplanung unterstützt. Die Grundlagen dieser Methode wurden in Abschnitt 2.3.2 dargelegt. Fallbasiertes Schließen wurde gewählt, da es sich hierbei um ein Planungsproblem handelt, welches eine Ähnlichkeitsbewertung ermöglicht und gleichzeitig mit dieser Methode eine Lösung effizient und innerhalb hinreichender Zeit zu erwarten ist. Weiters werden Analyse-, Bewertungs- und Zuordnungs-Schritte im Montageprozess inkl. einzelner Teilergebnisse dokumentiert und sind so im Fehlerfall für AV-Mitarbeitende einfach nachvollziehbar („explainable“). Die Methode wird nachfolgend zur automatisierten Ableitung von Montagereihenfolgen verwendet, wobei die Funktionsweise entlang der zu Grunde gelegten vier Phasen (Retrieve, Reuse, Revise, Retain) beschrieben wird:

**Retrieve (dt. Abrufen):** Dazu wird zunächst das virtuelle Produktmodell (3D-CAD-Modell) der zu montierenden Produktvariante analysiert und definierte Eigenschaften wie Geometriebedingungen oder Kontaktbeziehungen zwischen Baugruppen werden als separater Datensatz dokumentiert. Automatisiert werden insgesamt 40 verschiedene Charakteristiken einzelner Produktvarianten, Baugruppen sowie Einzelteile erhoben, wie beispielsweise Abmessungen, Schwerpunkte, Trägheitsachsen, Gewicht, Rohmaterial, Bezeichnungen oder Kontaktbeziehungen zu anderen Bauteilen. Aus einer vorliegenden Prozessdatenbank (Fallbasis) werden anschließend ähnliche Produktvarianten ermittelt und hinsichtlich der errechneten Ähnlichkeit zur aktuell zu planenden Produktvariante bewertet. Die Ähnlichkeit wird mittels einer zuvor definierten Ähnlichkeitsfunktion bewertet, wobei für eine Charakteristik (z.B. Schwerpunkt entlang X-Achse) die Differenz gebildet wird. Diese

wird anschließend zur Berechnung der relativen Ähnlichkeit (prozentuell) verwendet. Die Ähnlichkeitsfunktion setzt sich aus den relativen Ähnlichkeiten aller 40 Charakteristiken zusammen, wobei diese einzeln gewichtet sind. Die quantitative Gewichtung der einzelnen Charakteristiken wurde zuvor in einem paarweisen Vergleich ermittelt.

**Reuse (dt. Wiederverwenden):** Ist eine Ähnlichkeit gegeben, übersteigt diese also einen definierten Wert, wird diese in eine Liste ähnlicher Produktvarianten zur Wiederverwendung von Prozessinformationen aufgenommen. Jene Produktvariante, welche der aktuell zu planenden Produktvariante („New Case“) am ähnlichsten ist („Retrieved Case“), dient für die Reuse- sowie Revise-Phase als Vorlage zur automatisierten Ableitung des Montageplans.

**Revise (dt. Überarbeiten):** Um den wiederverwendeten Fall aus der zweiten Phase („Reuse“) für die neue Produktvariante anzupassen, werden zunächst die einzelnen Montageschritte des wiederverwendeten Falls durchlaufen. Dabei werden die einzelnen verplanten Baugruppen und Bauteile einzeln analysiert und es wird in der aktuellen (neu zu planenden) Produktvariante nach möglichst ähnlichen Baugruppen und Bauteilen gesucht. Auch hier wird auf die Ähnlichkeitsfunktion zurückgegriffen. Sofern die prozentuelle Ähnlichkeit höher als ein definiertes Mindestmaß ist, kann ein Bauteil der neuen Produktvariante als Ersatz für das Bauteil der alten Produktvariante gelten. Werden im alten Planungsfall andere Bauteile gefunden, welche dem aktuell betrachteten Bauteil der neuen Produktvariante noch ähnlicher sind, so wird die Zuordnung noch einmal angepasst. Sämtliche Arbeitsschritte des alten Montageplans, für welche keine ähnlichen Bauteile in der neu zu planenden Produktvariante gefunden werden konnten, werden mit einem besonderen Kennzeichen markiert.

**Retain (dt. Behalten):** Die vierte Phase „Retain“ erfolgt nach finaler Freigabe der erstellten Werkerinformationen. Dabei werden sowohl die automatisch analysierten Charakteristiken der einzelnen Bauteile als auch die neuen Anleitungs- und Prozessschritte in einer Fallbasis bzw. einer Datenbank gespeichert. Diese können nun für zukünftige Planungsfälle als weitere Grundlage verwendet werden.

AV-Mitarbeitende bauen in ihrer Planungstätigkeit nun auf dem erstellten Prozessplan auf und ordnen fehlende Teile und Baugruppen zu, wodurch sich ein erhebliches Einsparungspotenzial von manuellen Aufwänden im Informationserstellungsprozess ergibt (vgl. Reisinger et al. 2020).

Neben der zuvor erläuterten Montageplanung umfasst der von REISINGER et al. definierte Begriff Informationserstellung zusätzlich die Erstellung der

Werkerinstruktionen. Dies beinhaltet eine Ableitung virtueller Werkerinformationen (zum Beispiel Screenshots, Animationen und Teilmodelle für AR-Werkerführung) sowie die Erstellung von realen Werkerinformationen (zum Beispiel Fotos, Videos oder aufgezeichneten Sprachinstruktionen) (vgl. Reisinger et al. 2020). Algorithmen unterstützen im entwickelten Prozessmodell den AV-Mitarbeiter durch eine automatisierte Ableitung von Werkerinstruktionen auf Grund der vorliegenden Produktdaten, Prozess- und Ressourceninformationen.

Textuelle Werkeranweisungen werden je Montageschritt auf Grund von Textbausteinen erstellt. Folgende Eingangsinformationen werden dabei verwendet:

- Festgelegte Montagereihenfolge & Aufteilung in Montageschritte
- Zu montierende Bauteile und Baugruppen des Produkts
- Zu verwendende Werkzeuge, Hilfs- und Betriebsmittel
- Definierte Hinweise auf potenzielle Fehler
- Zielsprache, für welche Anweisungstexte generiert werden

Um eine effiziente Lesbarkeit sowie Interpretierbarkeit zu fördern, werden bei der Erstellung der Anweisungstexte Formatierungen und Farben nach einem zuvor festgelegten Standard verwendet: Bauteile größerer Abmessungen (Hauptkomponenten) werden in roter Farbe dargestellt, kleine Hilfsbauteile (zum Beispiel Normteile oder Verbindungselemente) werden in grüner Farbe ausgegeben und Werkzeugbezeichnungen in blauer Farbe. Definierte Hinweise auf potenzielle frühere Fehler werden in kursivem Schriftformat beziehungsweise als eigener Absatz ausgegeben.

Wie in den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit dargelegt wurde, ermöglicht eine Darstellung von Bauteilen, Geometrien und Werkzeugen in Form von virtuellen statischen Medien (Bilder beziehungsweise Screenshots) eine bessere Führung von Workern durch Montageprozesse als reine textuelle Werkeranweisungen (siehe Kapitel 2.2.3). Das entwickelte Prozessmodell begünstigt durch die Nutzung einzelner Algorithmen eine vollständig automatisierte Ableitung von Bildschirmbildern (Screenshots), welche den im aktuellen Montageschritt durchzuführenden Montagefortschritt als visuelle 3D-Information darstellen. Als Eingangsinformationen für die Algorithmen dienen folgende Informationen:

- Festgelegte Montagereihenfolge & Aufteilung in Montageschritte
- Zu montierende Bauteile und Baugruppen des Produkts
- Zu verwendende Werkzeuge, Hilfs- und Betriebsmittel
- Im Montageplanungsprozess manuell vom AV-Mitarbeiter über das Authoring-Tool festgelegte Perspektive und Zoom-Weite

Als Algorithmen ausgeführte Mediengeneratoren arbeiten dabei nach zuvor festgelegten Abläufen und erstellen je Montageschritt mehrere Abbildungen. Dabei wird auf das 3D-CAD-Produktmodell zurückgegriffen, daraus Screenshots aus mehreren Perspektiven erstellt, optional mit Zusatzinformationen (zum Beispiel Linien, Pfeile oder Textinformationen) überlagert. Einzelne Bilder werden anschließend automatisch nachbearbeitet, um beispielsweise eine optimale Auflösung zu gewährleisten. Die für den Montagemitarbeiter wichtigsten Informationen sind dabei die im aktuell betrachteten Montageschritt zu montierende Bauteile beziehungsweise Baugruppen, welche farblich dargestellt werden. Dabei wird auf denselben Farbstandard zurückgegriffen, welcher auch zur Erstellung von textuellen Werkeranweisungen angewandt wird. Je Montageschritt werden mehrere Bilder erstellt: (a) Ein Bild aus einer immer gleichen Perspektive, sodass sich der Montagemitarbeiter am Gesamtobjekt orientieren kann, (b) ein Bild aus einer zuvor bei der Montageplanung festgelegten Perspektive und (c) mehrere Bilder aus Standard-Perspektiven, wie beispielsweise Grundriss, Frontalriss, Seitenriss Links und Seitenriss Rechts. Eine automatisierte Erstellung von virtuellen dynamischen Werkerinstruktionen, wie beispielsweise Animationen oder 3D-CAD-Teilmodelle für eine AR-basierte Werkerführung wurden im Zuge dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Reale Werkerinstruktionen wie beispielsweise Fotos oder Videos von Baugruppen und Bauteilen sind nicht automatisiert erstellbar. Um dennoch Fotos, Videos und Sprachaufnahmen als Werkerinstruktionen möglichst effizient zu erstellen, wird der AV-Mitarbeiter durch eine mobile Tablet-Applikation beziehungsweise „App“ unterstützt. Hier werden wiederum Konzepte zur Automatisierung einzelner Tätigkeitsschritte zur Entlastung des AV-Mitarbeiters angewandt, sodass beispielsweise die Übertragung vom Endgerät (zum Beispiel Tablet) zur Datenbank sowie die Zuordnung zum korrekten Montageauftrag beziehungsweise der korrekten Produktvariante automatisch erfolgt, während sich der AV-Mitarbeiter auf die wesentliche Informationserstellung konzentrieren kann.

Damit erstellte Werkerinstruktionen für Montagemitarbeitende am Shop Floor zur Verfügung gestellt werden, sind diese zunächst in der Datenbank der visuellen Werkerführung anzulegen. Wie im Stand der Forschung (Kapitel 3) dargestellt, bieten industrielle Werkerführungssysteme systemspezifische Eingabemasken beziehungsweise Backend-Editoren an (vgl. Reisinger et al. 2020). Eine manuelle Eingabe der zuvor aufbereiteten Werkerinstruktionen erfordert jedoch ein ausgeprägtes Spezialwissen, Übung im Umgang mit der grafischen Eingabeoberfläche sowie einen hohen zeitlichen Aufwand.

Um die Effizienz der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme weiter zu steigern, wird auch dieser Prozessschritt im entwickelten Prozessmodell vom technischen System automatisiert übernommen. Dabei werden Postprozessoren eingesetzt, welche eine Übersetzerrolle und aktive Schnittstellenfunktion übernehmen. Im Kontext der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme dienen Postprozessoren als agentenbasierte, aktive Schnittstellen, welche Daten des entwickelten Prozessmodells als Eingangsinformationen nutzen, in die Datenstruktur des jeweiligen visuellen Werkerführungssystems übersetzen und diese übersetzten Informationen direkt in die Datenbank beziehungsweise in das Dateisystem der jeweiligen visuellen Werkerführung eintragen. Ein Postprozessor wird je Werkerführungssystem einmalig entwickelt und ist lediglich bei Änderung der Quellbeziehungsweise Ziel-Datenstruktur anzupassen. Voraussetzung für die Verwendung von Postprozessoren ist, dass die Datenstruktur bekannt ist und eine Möglichkeit geschaffen wird, um auf die Datenbank beziehungsweise das Dateisystem des visuellen Werkerführungssystems schreibend zuzugreifen.

#### 5.4 Formulierung des Informationsmodells

Das in Abschnitt 5.3 entwickelte Prozessmodell beschreibt die Prozessschritte im Vorgehensmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme und definiert die manuelle Eingabe beziehungsweise die automatisierte Einbringung von Produkt-, Prozess- und Ressourcenwissen, sodass Werkerinformationen automatisiert erstellt werden. Sowohl eingegebene als auch automatisiert generierte Wissens- und Informationselemente sind als Daten kodiert in einer Datenbank zu hinterlegen. Zur Darstellung von Struktur, Abhängigkeiten und Umfang der gespeicherten Daten wird nachfolgend ein objektorientierter Modellierungsansatz verfolgt. Dieser ermöglicht eine einfache und verständliche Abbildung der Wirklichkeit. Dazu wird in nachfolgender Abbildung 18 die konzeptionierte Architektur des Informationsmodells mittels eines UML 1.0 Klassendiagramms dargestellt und nachfolgend näher erläutert.

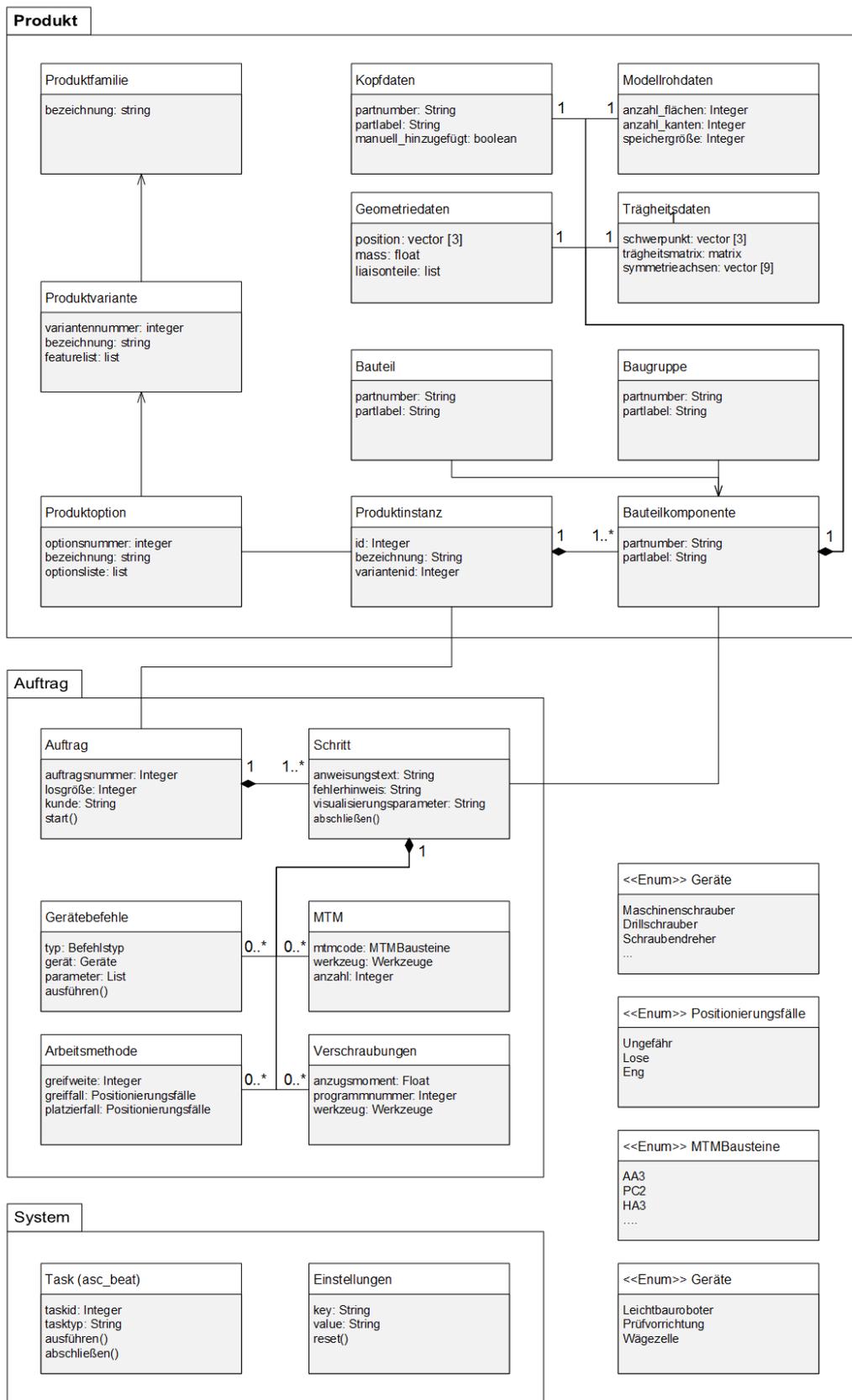


Abbildung 18: Informationsmodell zur Repräsentation von Informationen und Wissen im Vorgehensmodell (UML 1.0 Klassendiagramm)

Der Informationscluster Montageauftrag umfasst Informationen über den Kunden, eine Kundenspezifikation, Liefertermine sowie Losgrößeninformationen. Dabei liegt eine Direktbeziehung zwischen Montageauftrag und einer zu produzierenden Produktinstanz vor. Eine Produktinstanz ist dabei eine vom Kunden in Form einer Produktspezifikation festgelegte und in einem Informationssystem (zum Beispiel PLM- oder ERP-System) gespeicherte spezielle Ausprägung einer allgemeinen Produktfamilie (zum Beispiel Getriebe).

In Anlehnung an JONAS (vgl. Jonas 2000) werden nachfolgend produkt- und produktvariantenbezogene Begriffe wie folgt festgelegt: Eine Produktfamilie ist als allgemeine Klasse definiert und fasst dabei mehrere mögliche Produktvarianten (zum Beispiel unterschiedliche Leistungsstufen eines Getriebes) zusammen. Produktvarianten sind wiederum durch einzelne Produktoptionen (zum Beispiel Ausprägung und Farben der Lackierung des Getriebegehäuses) näher definierbar. Während sich Produktvarianten durch zumindest eine geometrische oder strukturelle Eigenschaft (zum Beispiel Abmessung, Bauteilbezeichnung) voneinander unterscheiden, sind Produktoptionen geometrisch und strukturell gleich definiert, differenzieren sich jedoch durch andere Merkmale wie beispielsweise Farben oder Beschriftungen. Unterschiedliche Produktvarianten können somit in der Montageplanung zu unterschiedlichen Montagereihenfolgen beziehungsweise Zwischenschritten führen, während Produktoptionen lediglich einzelne variable Informationen (zum Beispiel Entnahmeort des betroffenen Bauteils oder zu applizierende Lackierfarbe) darstellen.

Der Informationscluster Produktinstanz besteht aus einer oder mehreren Bauteilkomponenten, welche zumindest eine eindeutige Bezeichnung („Partnumber“ beziehungsweise Bauteilnummer, zum Beispiel „1383025\_5\_16“) sowie eine für Menschen verständliche Bezeichnung („Partlabel“ beziehungsweise Bauteilkomponentenbezeichnung, zum Beispiel „Sechskantschraube M5x16“) enthalten. Eine Bauteilkomponente stellt entweder ein einzelnes Bauteil oder eine Baugruppe dar. Eine Baugruppe besteht selbst wiederum aus weiteren Bauteilen und Baugruppen, während ein Bauteil ein Einzelteil ohne untergeordneter Stücklisten-Struktur darstellt. Eine Bauteilkomponente wird im entwickelten Vorgehensmodell durch eine Vielzahl an Eigenschaften beziehungsweise Daten beschrieben, welche in vier Kategorien unterschieden werden:

- Kopfdaten enthalten allgemeine Daten, welche zur Identifikation des Bauteils beziehungsweise zur einfachen Differenzierung von anderen Bauteilen genutzt werden, wie beispielsweise „Partnumber“ und „Partlabel“ (siehe oben).

- Geometriedaten geben geometrische Eigenschaften der Bauteilkomponente an, wie beispielsweise Abmessungen, Positionen, Orientierungen, Volumen sowie Beziehungen zu umliegenden Bauteilkomponenten.
- Trägheitsdaten werden zur Speicherung der Lage des Schwerpunkts, Trägheitsmatrizen und Symmetrieachsen genutzt und enthalten implizit Informationen über Form und Rotationssymmetrie der Geometrien.
- Modellrohdaten enthalten Rohdaten, welche bei der Verarbeitung und Darstellung von 3D-CAD-Daten genutzt werden, beispielsweise Anzahl von Flächen, Kanten und Punkten sowie die Größe des Speicherbedarfs des virtuellen Datenobjekts.

Einem Montageauftrag werden von einem AV-Mitarbeiter ein oder mehrere Montageschritte zugewiesen und näher detailliert. Ein Montageschritt wird durch einen Anweisungstext, Hinweise auf potenzielle Fehler oder Parameter zur Visualisierung von Instruktionsmedien näher beschrieben. Einem Montageschritt werden zusätzlich folgende Informationen, jeweils in Listenform, zugewiesen:

- Verschraubungen definieren im aktuellen Montageschritt auszuführende Schraubprozesse und werden unter anderem durch das gewünschte Anzugsmoment, das zu verwendende Werkzeug sowie das anzuwählende Schraubprogramm beschrieben.
- Gerätebefehle werden zur Ansteuerung von Geräten, Hilfsmitteln, Robotern oder Werkzeugen verwendet und enthalten den Typ (zum Beispiel Programm oder Parameter), eine eindeutige Kennung des anzusteuernenden Geräts sowie eine Liste zusätzlicher Parameter.
- Arbeitsmethodenbeschreibungen enthalten erweiterte Informationen zur Durchführung des Montageschritts beziehungsweise zur Ausgestaltung des physischen Montagesystems, wie beispielsweise Greifweiten, Greif- und Platzierfälle.

Als systemrelevante Daten gelten Informationsklassen, welche zur Anwendung des Vorgehensmodells beziehungsweise des zu implementierenden Software-Artefakts benötigt werden und enthalten Tasks und Einstellungen. Ein Task ist ein einzelner Teilauftrag im Prozessmodell, welcher die Ansteuerung und erfolgreiche Durchführung der Algorithmen dokumentiert und überwacht. Einstellungen sind unternehmensspezifische Konfigurationen zur individuellen Anpassung des Prozessmodells. Enumerationen stellen listenförmige Auswahlmöglichkeiten für einzelne Informationsklassen dar. Die Architektur des Informationsmodells zur Verarbeitung von Daten im Prozessmodell definiert dafür folgende Enumerationen:

- Die Enumeration „Werkzeuge“ stellt eine Unternehmens- oder Montagesystem-spezifische Liste an verfügbaren Handwerkzeugen dar, zum Beispiel Handschrauber, Maschinenschrauber etc.
- Die Enumeration „Geräte“ stellt eine Unternehmens- oder Montagesystem-spezifische Liste an verfügbaren Geräten dar, zum Beispiel Leichtbauroboter, Prüfvorrichtung etc.
- Die Enumeration „Positionierungsfälle“ dient einer näheren Beschreibung von Positionsfällen für Greif- und Positionstätigkeiten, zum Beispiel Ungefähr, Lose, Eng

## 5.5 Kritische Reflexion und Zusammenfassung

Kapitel 5 beschreibt die Entwicklung, die Konzeption sowie die Ausprägungen des Vorgehensmodells (bzw. „Artefakts“) und umfasst damit die dritte Phase des DSRM-Nominalprozesses "Design und Entwicklung". Das Artefakt wird dabei unter Berücksichtigung der in den vorhergehenden Kapiteln erarbeiteten Teil-Ergebnisse konstruiert. Die Beschreibung des Ist-Zustandes durch die Formulierung des manuellen Prozesses sowie des mathematischen Modells stellen dabei die Grundlage dar. Durch den Einbezug der abgeleiteten Anforderungen und einer Realisierung der identifizierten Automatisierungspotenziale werden die beiden Teil-Artefakte Prozessmodell sowie Vorgehensmodell formuliert.

Das Prozessmodell beschreibt den schrittweisen Ablauf im Vorgehensmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme und wird in Anlehnung an den manuellen Prozess in die drei Abschnitte "Montageplanung durchführen", "Werkerinstruktionen erstellen" sowie "Werkerinstruktionen eintragen" eingeteilt. Als Startpunkt des Prozessmodells wird die Annahme eines Planungsauftrags durch einen AV-Mitarbeiter definiert und es erfolgt zunächst eine automatisierte Prüfung, ob die zu planende Produktvariante in exakter Übereinstimmung in der Vergangenheit schon einmal geplant wurde. Handelt es sich um einen neuen Planungsauftrag, wird zunächst das 3D-CAD-Modell des Produkts analysiert und hinsichtlich der Charakteristiken der Baugruppen sowie der Produktstruktur untersucht. Mittels fallbasiertem Schließen werden Montage-reihenfolgen und Parameter der einzelnen Schritte automatisch für die neue Produktvariante übernommen und angepasst. AV-Mitarbeitende erhalten diese Informationen als Vorschlag und es erfolgt eine manuelle Prüfung beziehungsweise Nachbearbeitung. Nach Freigabe dieser eingegeben Informationen erfolgt eine automatisierte Aufbereitung der einzelnen Werkerinstruktionen sowie Medien durch einen Mediengenerator. Nach abschließender manueller Prüfung werden sämtliche

aufbereitete Instruktionen über einen Postprozessor in das gewünschte visuelle Werkerführungssystem übertragen, sodass eine schrittweise Anleitung von Montagemitarbeitenden möglich wird.

Das formulierte Prozessmodell ermöglicht es somit, Stärken und Schwächen von Mensch und Computersystem zu kombinieren, sodass Routineaufgaben automatisiert verarbeitet werden, während beispielsweise der Mensch sein essenzielles Wissen über Produkt, Prozess sowie Ressourcen an verschiedenen Stellen einbringt. Das Informationsmodell beschreibt die Darstellung der Struktur, Abhängigkeiten sowie den Umfang der gespeicherten sowie verarbeiteten Daten. Dabei wird ein objektorientierter Modellierungsansatz verfolgt und die einzelnen Informationen sowie deren Beziehungen untereinander als UML 1.0 Klassendiagramm dargestellt. Das Informationsmodell wird dabei in folgende drei Informationscluster unterteilt:

- Montageauftrag
- Produktinstanz
- Systemrelevante Daten

Prozess- und Informationsmodell wirken zusammen und ergeben das zu entwickelnde Vorgehensmodell. Nachfolgend wird das entwickelte Vorgehensmodell als Software-Artefakt implementiert und mittels eines Fallbeispiels hinsichtlich Auswirkungen auf Effektivität und Effizienz des Informationsversorgungsprozesses visueller Werkerführungssysteme untersucht.

## 6 Validierung durch Anwendung des Vorgehensmodells

In diesem Kapitel wird die prototypische Implementierung des entwickelten Vorgehensmodells als Software-Artefakt beschrieben. Dieses dient der Demonstration des in Kapitel 5 dargestellten Konzepts sowie seiner Funktionen und wird zur Validierung des entwickelten Vorgehensmodells verwendet. Dazu wird ein Fallbeispiel bearbeitet, in welchem das implementierte Software-Artefakt zur Unterstützung der Informationsversorgung für mehrere Varianten eines Produkts angewandt wird. Dabei werden quantitative Kenngrößen (zum Beispiel Zeiten und deren Veränderung zwischen manuellem Ausgangszustand und automatisiertem Zielzustand) sowie qualitative Aussagen (zum Beispiel Benutzerfreundlichkeit der grafischen Eingabeoberflächen) erhoben.

### 6.1 Prototypische Implementierung des Vorgehensmodells

In Kapitel 5 wurde die Konzeption eines Vorgehensmodells zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme dargelegt. Dieses Vorgehensmodell setzt sich aus den Teilartefakten Prozess- sowie Informationsmodells zusammen. Um das Vorgehensmodell anwendbar zu machen sowie Auswirkungen hinsichtlich Effektivität und Effizienz zu demonstrieren und zu messen, wird dieses als Software-Artefakt implementiert. Dieses stellt im Nominalprozess von PEFFERS et al. eine Instanz des Vorgehensmodells dar, bildet somit die vierte Phase „Demonstration“ des DSRM-Nominalprozesses (vgl. Peffers et al. 2007) und wird im vorliegenden Abschnitt näher beschrieben. Dabei wird zunächst die implementierte Plattform des Software-Artefakts erläutert. Diese stellt das technische System der Zusammenarbeit zwischen technischem System und Anwendenden dar und umfasst ein kommunikationsfähiges Basissystem, Algorithmen zur Analyse und Verarbeitung von Daten sowie Datenbank- und Dateisystem zur kurz- oder langfristigen Aufbewahrung von Daten und Informationen. Die graphische Benutzeroberfläche des Software-Artefakts beschreibt die Mensch-Maschine Schnittstelle. Dabei steht der Mensch sowie seine beziehungsweise ihre Anforderungen hinsichtlich einer positiven Benutzerfreundlichkeit der einzelnen Oberflächen im Vordergrund. Abschließend wird die Integration des Software-Artefakts im Unternehmen mit speziellem Fokus auf die Montagesystemumgebung erläutert. Im Sinne einer Kollaboration zwischen Mensch und Computer stehen drei Akteure im Fokus: (a) der Mensch in der Rolle des planungsausführenden AV-Mitarbeiters, (b) ein technisches Computersystem in Form eines Softwarewerkzeuges sowie (c) die Schnittstelle beziehungsweise Interaktionsform zwischen Mensch und Softwarewerkzeug.



Abbildung 19 stellt die Struktur des implementierten Software-Artefakts in einem UML 2.0 Komponentendiagramm dar. Dieses wird in drei Subsysteme gegliedert und nachfolgend näher beschrieben:

- Plattform des Software-Artefakts
- Graphische Benutzeroberfläche des Software-Artefakts
- Weitere Informationssysteme des Unternehmens

### 6.1.1 Plattform des Software-Artefakts

Als Plattform des Software-Artefakts wird im Kontext dieser Arbeit das technische Computersystem des Gesamtsystems bezeichnet. Die Plattform bildet ein Linux Ubuntu Betriebssystem und wird als physische oder virtuelle Maschine im Unternehmensnetzwerk implementiert und integriert. Dieses Computersystem verfügt über ein Dateisystem zur Speicherung von Dateien wie beispielsweise 3D-CAD-Modelle, generierte Medien oder Quell- beziehungsweise Objektcode einzelner Algorithmen. Eine relationale Datenbank liegt im MySQL-Format vor und dient einer tabellarischen Speicherung von Datensätzen wie beispielsweise Aufträgen, Montageschritten, Bauteilbeschreibungen und Konfigurationssätzen. Ein Apache Webserver dient als Kommunikationsschnittstelle zu umliegenden Subsystemen und ist als Representational State Transfer (REST) Service ausgeführt. Innerhalb dieser Plattform kommuniziert ein Webserver mit einer Datenbank sowie einem Dateisystem und ermöglicht somit Verarbeitung, Aufbereitung sowie Eintragung von Informationen beziehungsweise Daten. Mediengeneratoren dienen zur automatisierten Erstellung von Texten und virtuellen Bildern (Screenshots) zur illustrativen Beschreibung einzelner Montageschritte. Ein implementierter Textgenerator ist als Java-Applikation ausgeführt und nutzt Informationen von Produktvariante, Montageprozess und Ressourcen, um mittels definierter Regeln einfache und für den mit Informationen zu versorgenden Montagemitarbeiter verständliche Sätze zu erstellen. Einzelne generierte Sätze werden als Textelemente in einer Datenbank gespeichert. Ein Bildgenerator wurde auf Grund des erforderlichen, ressourcenintensiven Grafik-Renderings als externer Webservice ausgeführt. Die Kommunikation erfolgt dabei als REST-Schnittstelle zwischen Plattform und externem Webservice. Dabei werden das 3D-CAD-Modell sowie der kodierte Montageplan übergeben und nach erfolgter Bildgenerierung alle erzeugten Bilder automatisiert heruntergeladen und im Dateisystem des Software-Artefakts gespeichert. Wie in Abschnitt 5.3 erläutert, werden zur Generierung von Texten und Bildern vom Unternehmen festgelegte Farbkodierungen verwendet, sodass große Bauteile mit größeren Abmessungen (Hauptkomponenten) in roter Farbe, kleinere Hilfsbauteile (Normteile,

Verbindungselemente) in grüner Farbe und Werkzeuge in blauer Farbe dargestellt werden. Nach erfolgter Aufbereitung der Werkerinstruktionen werden diese in die Datenbank, respektive Dateisystem, des gewünschten visuellen Werkerführungssystems übertragen. Dies erfolgt mittels Postprozessoren, welche als Java-Algorithmen ausgeführt sind, auf Datenbank und Dateisystem der Plattform des Software-Artefakts zugreifen, die dort gespeicherten Daten in das Zielformat wandeln und in das visuelle Werkerführungssystem automatisiert übertragen. Die Ausgestaltung der Übertragung ist abhängig von der Werkerführungslösung und erfolgt beispielsweise durch eine direkte Datenbankverbindung, eine definierte Schnittstelle oder durch eine Erstellung und Übertragung von Dateien (beispielsweise via File Transfer Protocol – kurz FTP).

### 6.1.2 Graphische Benutzeroberfläche des Software-Artefakts

Im Kontext dieser Arbeit stellt die graphische Benutzeroberfläche des Software-Artefakts die Mensch-Maschine Schnittstelle dar. Eine ergonomische Gestaltung der Benutzerelemente sowie eine hohe Benutzerfreundlichkeit ermöglichen eine positive Nutzererfahrung und in weiterer Folge eine hohe Effizienz bei der Durchführung von Informationseingaben durch den AV-Mitarbeiter (Anwender). Als Interaktionsgeräte dienen hierbei klassische Desktop-Computer (Computer, Bildschirm, Maus, Tastatur) und mobile Geräte wie beispielsweise Tablets oder Smartphones (Touch-Oberfläche).

Wie in Abschnitt 5.3 erläutert, werden AV-Mitarbeitende bei der Durchführung der Montageplanung unterstützt. Dies beinhaltet einen automatisiert erarbeiteten Vorschlag der Montagereihenfolge, eine Definition von Montageschritten, Werkzeugen und Hilfsmitteln sowie zusätzlicher Parameter. Ein wesentlicher Teil des implementierten Software-Artefakts stellt somit das entwickelte Authoring-Tool dar, welches sich aus der freien 3D-CAD-Software FreeCAD sowie der eigentlichen Authoring-Oberfläche zusammensetzt und den menschlichen Planer bei der Eingabe zuvor definierter Informationen auf einem Desktop-Computer unterstützt. Als Schnittstelle zwischen FreeCAD und Authoring-Oberfläche dient eine von FreeCAD angebotene Python-Schnittstelle, welche von einer als .NET-Applikation ausgeführten Authoring-Oberfläche angesteuert wird. Durch diese Trennung ist es möglich, für den Authoring-Prozess neben FreeCAD zukünftig auch andere 3D-CAD-Softwarelösungen zu nutzen. Eine Ausführung einzelner Befehle (zum Beispiel Schritt hinzufügen) erfolgt durch eine Werkzeugleiste (Toolbar) in FreeCAD.



Abbildung 20: Authoring-Tool (freie CAD-Software FreeCAD und Authoring Oberfläche) zur Unterstützung des Montageplanungsprozesses

Abbildung 20 stellt einen Screenshot des Authoring-Tools dar. Dargestellt sind eine 3D-Umgebung und eine Baumdarstellung von FreeCAD, eine Toolbar zum Starten einzelner Befehle sowie eine Eingabemaske der Authoring-Oberfläche zur Definition eines Montageschritts. AV-Mitarbeitende wählen dabei mehrere Bauteile aus, fassen diese über eine Toolbar zu einem Montageschritt zusammen und legen Details zum Montageschritt wie beispielsweise Schraubdaten, zusätzliche Bauteile oder Fehlerhinweise in der Eingabemaske fest. Schrauben werden automatisiert erkannt und auf Grund Ihrer Geometrie werden Vorschläge für die Parametrisierung des Schraubprozesses (zum Beispiel Einschraubtiefe, Drehmoment, Werkzeug) angeboten. AV-Mitarbeitende werden somit durch eine einfache Benutzeroberfläche zur Eingabe der Montageplanungsinformationen durch eine Assistenzfunktion unterstützt und entlastet.

Wie im entwickelten Vorgehensmodell definiert (siehe Abschnitt 5.3), wird das 3D-CAD Modell der aktuell zu planenden Produktvariante noch vor der Durchführung des Montageplanungsschritts analysiert und hinsichtlich Ähnlichkeit zu früheren, bereits geplanten Produktvarianten bewertet. Sind Ähnlichkeiten zu früheren Produktvarianten festzustellen, erfolgt eine automatisierte Ableitung des Montageplans für die neue Produktvariante mittels fallbasierten Schließens. Bei Start der Montageplanung wird dem AV-Mitarbeiter mitgeteilt, welche früheren Produktvarianten in welchem Gütegrad ähnlich sind, welche Bauteile automatisiert zu Montageschritten zugeordnet werden konnten und welche Bauteile nicht automatisiert zugeordnet werden konnten, siehe nachfolgende Abbildung 21.



Mitarbeitende haben anschließend die Aufgabe, fehlende Bauteile durch Nutzung des Authoring-Tools einzuordnen, beispielsweise indem diese bei bestehenden Schritten eingefügt werden oder in neuen Montageschritten zusätzlich eingeplant werden. Durch Nutzung von Fallbasiertem Schließen bzw. Case-Based Reasoning erfolgt eine Assistenz des menschlichen Planers, sodass sich dieser auf die Zuordnung von fehlenden Bauteilen beziehungsweise die Überprüfung der Ergebnisse des Algorithmus fokussieren kann, anstatt den gesamten Montageplanungsprozess von Grund auf neu durchzuführen. Nach erfolgter Montageplanung wird der Planungsprozess über eine Schaltfläche der Toolbar abgeschlossen. Eingegebene Informationen werden über eine REST-Schnittstelle an den Webserver der Plattform des Software-Artefakts übergeben und in der Datenbank gespeichert, sodass die weitere Aufbereitung und Eintragung von Werkerinformationen automatisiert erfolgt. Um ebenso reale Werkerinformationen wie beispielsweise Fotos oder Videos von physischen Prototypen und Montageprozessen zu erstellen, dient eine Applikation („App“), welche auf mobilen Geräten wie beispielsweise Tablets oder Smartphones genutzt wird. Diese ermöglicht das Aufnehmen von Fotos, Videos und Sprachaufnahmen und durch Eingabe der eindeutigen Auftragsnummer eine automatisierte Zuordnung sowie Übertragung an die Plattform des Software-Artefakts. Zur finalen Prüfung und Freigabe der Werkerinformationen dient eine Weboberfläche. Diese ist über eine REST-Schnittstelle mit der Plattform des Software-Artefakts integriert und bereitet die erstellten Werkerinformationen in übersichtlicher Form auf, sodass diese ident zur visuellen Werkerführung visualisiert werden und von menschlichen Anwendenden überprüft und freigegeben werden.

### 6.1.3 Integration des Software-Artefakts in die Systemumgebung

Der in Abbildung 19 dargestellte modulare Aufbau des Software-Artefakts ermöglicht eine einfache Integration in die Systemumgebung von Unternehmen. Durch eine containerbasierte Ausführung der Plattform des Software-Artefakts als virtuelle beziehungsweise physische Maschine wird dieses als eigener Kommunikationsteilnehmer in das Netzwerk integriert. Um Planungsaufträge und Produktdaten an das Software-Artefakt zu übergeben, dient eine definierte REST-Schnittstelle des Webservers, über welche weitere Informationssysteme des Unternehmens wie ERP- oder PLM-Systeme mittels einer Netzwerkverbindung integriert werden. Die detaillierte Ausprägung der Schnittstelle und Protokolle ist dabei vom Informationssystem selbst abhängig. Eine Integration mit visuellen Werkerführungssystemen wird durch Postprozessoren ermöglicht. Ein Postprozessor dient dabei als aktive – als Algorithmus implementierte – Schnittstelle zur Übersetzung und Eintragung von

Informationen und ist für jedes individuelle visuelle Werkerführungssystem einmal zu entwickeln und zu integrieren.

Im Zuge des Demonstrations- und Validierungsprozesses erfolgte die Integration des entwickelten Software-Artefakts in die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0. Diese stellt eine realitätsnahe Laborumgebung dar und ermöglicht unter anderem den Test von Software- oder Hardwareprototypen, ohne produktive Abläufe zu stören. Die Integration schließt eine Entwicklung von Schnittstellen an vorliegende Informationssysteme wie beispielsweise ERP- und PLM-Systeme sowie an visuelle Werkerführungssysteme über Postprozessoren ein.

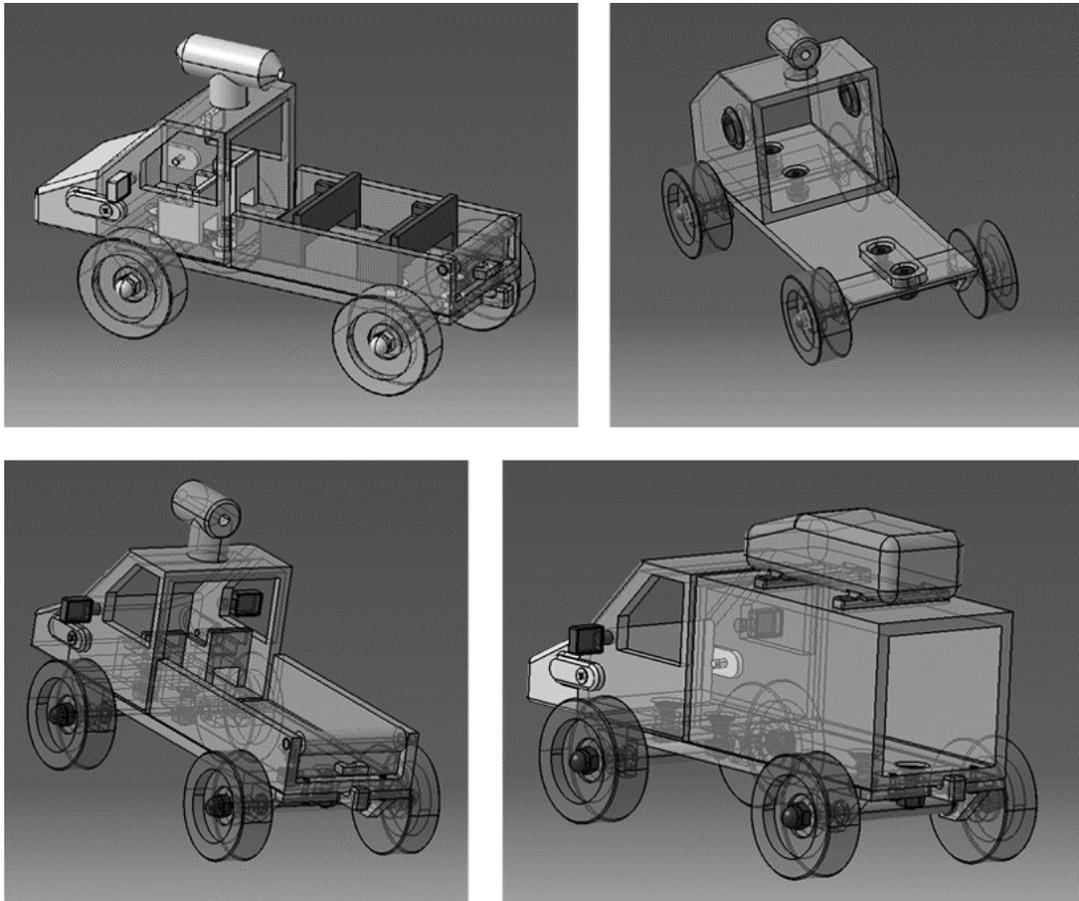
## 6.2 Validierung des Vorgehensmodells durch ein Fallbeispiel

Nach Abschluss der dritten und vierten Phase „Design und Entwicklung“ (Kapitel 5) sowie „Demonstration“ (Abschnitt 6.1) folgt im von PEFFERS et al. definierten Nominalprozess der DSRM die Validierung des entwickelnden und demonstrierten Artefakts. Dabei wird dieses zur Lösung eines definierten Problems herangezogen und es wird beobachtet beziehungsweise gemessen, wie gut sich das entwickelte Artefakt zur Lösung ebendieses Problems eignet und ob die in der zweiten Phase „Ziele der neuen Lösung definieren“ (Abschnitt 4.2) definierten Anforderungen erfüllt werden (vgl. Peffers et al. 2007). Abhängig von der Art des Problems beziehungsweise des Artefakts, stehen nach PEFFERS für die Validierung eine Vielzahl möglicher Methoden beziehungsweise Ausprägungen zur Verfügung, um die qualitativen sowie quantitativen Auswirkungen zu erheben. Dies schließt unter anderem eine Durchführung von Simulationen, Auswertung von Zufriedenheitsumfragen, Dokumentation von Anwenderfeedback sowie Messung der Systemleistung (zum Beispiel Zeiten oder Kosten) mit ein (vgl. Peffers et al. 2007). Zur Validierung des entwickelten Software-Artefakts wurde ein Fallbeispiel bearbeitet, welches die Systemleistung (zeitliche Aufwände) mit und ohne Anwendung des Vorgehensmodells misst.

### 6.2.1 Beschreibung des Fallbeispiels

Ziel ist eine realitätsgetreue und praxisnahe Validierung des Vorgehensmodells durch Anwendung des entwickelten Software-Artefakts zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme. Dabei ist zu prüfen, ob eine Effizienzsteigerung hinsichtlich der benötigten Planungszeit bei gleichbleibender Qualität im Vergleich zur derzeit üblichen manuellen Informationsversorgung möglich ist. Im Vorfeld der Validierung wurden 15 verschiedene Produktvarianten eines Demonstrationsprodukts (Modell-LKW) als 3D-CAD-Modell vorbereitet, um möglichst

praxisnahe Bedingungen zu schaffen. Die Variationen des Produkts beschränken sich auf zusätzliche, verminderte oder geänderte Bauteile sowie unterschiedliche Abmaße einzelner Bauteile, siehe nachfolgende Abbildung 22.



**Abbildung 22: Vier der 15 zu planenden Produktvarianten des im Fallbeispiel verwendeten Produkts Modell-LKW**

Um die Komplexität eines realen Produktionsumfelds zu berücksichtigen, wurde anhand eines Zufallsgenerators die Reihenfolge der zu planenden Varianten zufällig festgelegt. Insgesamt wurden 30 Planungsdurchgänge durchgeführt, wobei jede Variante mindestens einmal geplant wurde.

## 6.2.2 Ablauf des Fallbeispiels & Anwendung des Vorgehensmodells

Die durchzuführenden Schritte des Planungsprozess leiten sich aus dem in Abschnitt 4.1 analysierten manuellen Informationsversorgungsprozess ab und wurden wie folgt gegliedert:

1. Prüfen ob zu planende Variante bereits geplant wurde ( $t_{Vorb\_Pruefen}$ )
2. Falls zu planende Variante bereits geplant wurde: Suche nach Montageanleitung ( $t_{Vorb\_Suchen}$ )
3. Festlegung der Montagereihenfolge ( $t_{MP\_ges}$ )
4. Schreiben von Texten für Werkerführung ( $t_{Gen\_VText}$ )
5. Erstellen von Screenshots für Werkerführung ( $t_{Gen\_VBild}$ )
6. Eingabe der Daten in die Werkerführung ( $t_{Input\_ges}$ )
7. Prüfung der Montageanleitung in der Werkerführung ( $t_{Check\_ges}$ )

Für jeden dieser Schritte erfolgte eine separate Zeitaufnahme, um einen anschließenden Vergleich zu ermöglichen. Ist die zu planende Variante bereits in der Vergangenheit geplant worden, entfallen die Schritte 3-6.

Im Zuge dieses Fallbeispiels werden zwei verschiedene Planungsmethoden zur Durchführung der Informationsversorgung verglichen und die dabei anfallenden zeitlichen Aufwände gemessen:

- **Planungsmethode „Manuelle Informationsversorgung“** für ein Werkerführungssystem: Die Montageplanung erfolgt zur Gänze manuell. Dies entspricht dem Stand der Technik in den meisten produzierenden Unternehmen und dient als Referenzwert für den Ist-Zustand.
- **Planungsmethode „Automatisierte Informationsversorgung“** unter Anwendung des Vorgehensmodells, welches als Software-Artefakt implementiert wurde: Mittels einer eigens entwickelten Authoring-Software (steuerbar über eine graphische Benutzeroberfläche) wird die Montagereihenfolge festgelegt, wobei der Anwenderin beziehungsweise dem Anwender ein Vorschlag für die Montagereihenfolge bereitgestellt wird. Screenshots und Texte werden automatisch abgeleitet und die erzeugten Anleitungsinhalte werden über eine aktive Schnittstelle an das Werkerführungssystem übertragen.

Die Bearbeitung des Fallbeispiels wurde durch zwei Personen durchgeführt, welche zuvor noch nicht mit dem entwickelten Software-Artefakt gearbeitet haben, jedoch Grundwissen in Maschinenbau, Konstruktion sowie Montageplanung aufweisen. Für

die Qualitätsbewertung der beiden Methoden (manuell, automatisiert) wurden bei der Durchführung von Schritt 7 (Prüfung in Werkerführung) diverse Verbesserungsmöglichkeiten herausgearbeitet und in Form von Anmerkungen für eine zukünftige Weiterentwicklung des Artefakts festgehalten.

### 6.2.3 Darstellung der Ergebnisse

Im nachfolgenden Abschnitt erfolgt eine Aufschlüsselung der im Zuge der Validierung generierten Ergebnisse. Zur anschaulichen Darstellung werden Diagramme und Tabellen verwendet. Die Zeitaufnahme erfolgte mithilfe eines Makros innerhalb eines Excel-Arbeitsblatts, welches die jeweiligen Zeitstempel per Doppelklick automatisiert speichert und durch die Methode der Fortschrittszeitermittlung die Dauer einzelner Tätigkeiten berechnet.

#### Manuelle Informationsversorgung:

In nachfolgender Abbildung 23 ist der Zeitaufwand für die durchgeführte, manuelle Informationsversorgung dargestellt. Die horizontale Achse stellt die Nummer des Planungsdurchgangs und anschließend die zu planende Produktvariantennummer dar. Bei sehr kleinen Balken (geringer Zeitaufwand) handelt es sich um bereits zuvor geplante Varianten, da in diesem Fall die Planungsergebnisse des früheren Planungslaufs wiederverwendet werden konnten. Es sind alle zuvor beschriebenen Planungsschritte enthalten. Im weiteren Verlauf der Validierung werden bei der automatisierten Informationsversorgung nur mehr drei Schritte beachtet, da die restlichen Schritte vollständig automatisiert erfolgen.

**Tabelle 4: Zeitliche Aufwände, bei manueller Informationsversorgung ohne Software-Artefakt**

	<b>Zeitliche Aufwände</b>
<b>Gesamtdauer</b>	09:25:14
<b>Längste neue Planung</b>	01:46:40
<b>Kürzeste neue Planung</b>	00:16:59
<b>Mittelwert</b>	00:18:50

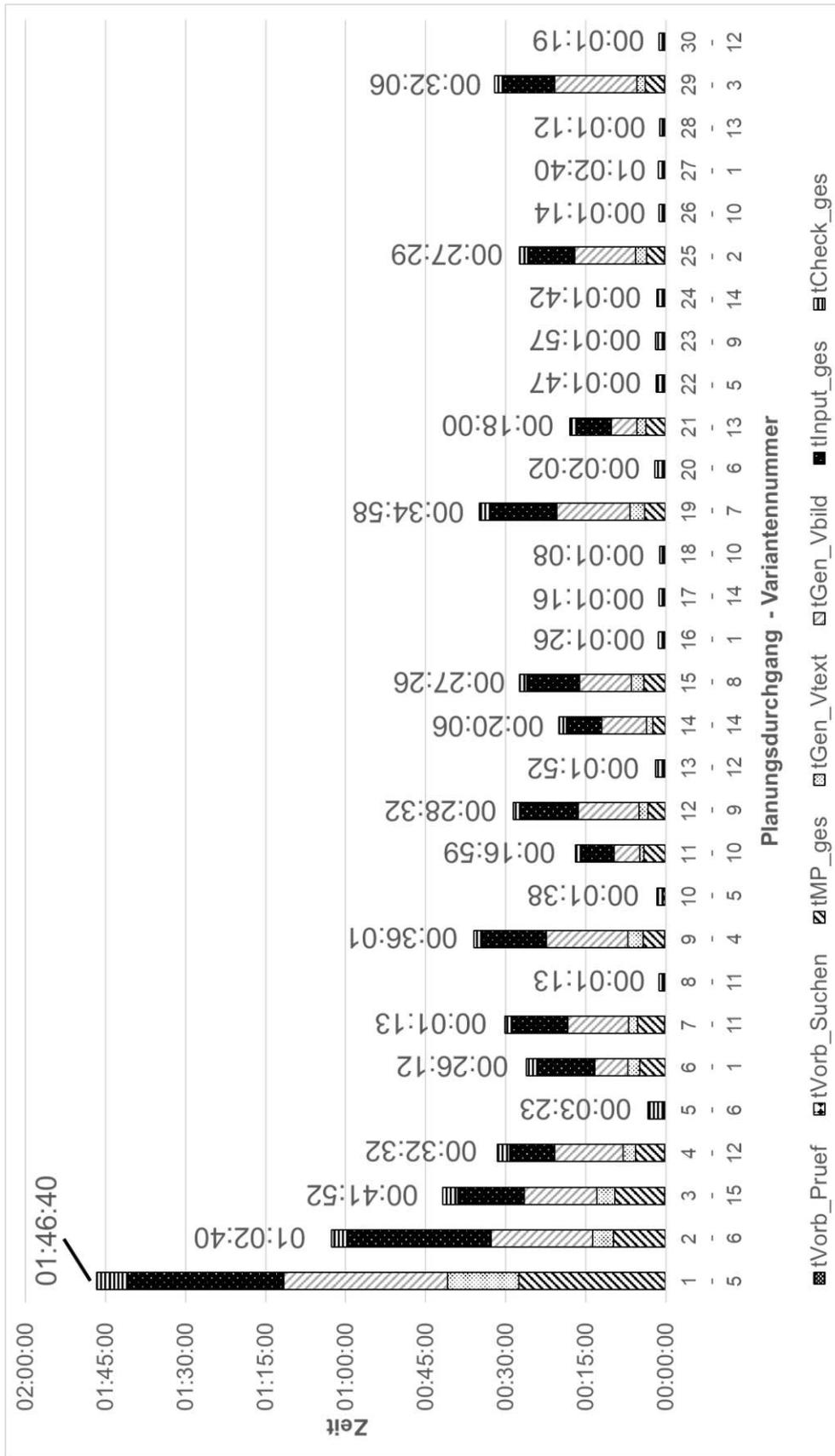


Abbildung 23: Zeitliche Aufwände bei manueller Informationsversorgung ohne Software-Artefakt

**Automatisierte Informationsversorgung:**

In nachfolgender Abbildung 24 sind die zeitlichen Aufwände für die automatisierte Informationsversorgung mithilfe des Software-Artefakts dargestellt.

Da ein Großteil der Einzeltätigkeiten automatisiert wurde und somit nicht als manueller Zeitaufwand gemessen wurde, ist in Abbildung 24 ersichtlich, dass nurmehr die Zeiten von drei Tätigkeitsschritten (anstatt von sieben Tätigkeitsschritten wie bei der manuellen Planung) gemessen und dargestellt werden.

**Tabelle 5: Zeitliche Aufwände, bei Nutzung des Software-Artefakts mit FBS**

	<b>Zeitliche Aufwände</b>
<b>Gesamtdauer</b>	00:55:25
<b>Längste neue Planung</b>	00:09:35
<b>Kürzeste neue Planung</b>	00:00:28
<b>Mittelwert</b>	00:01:48

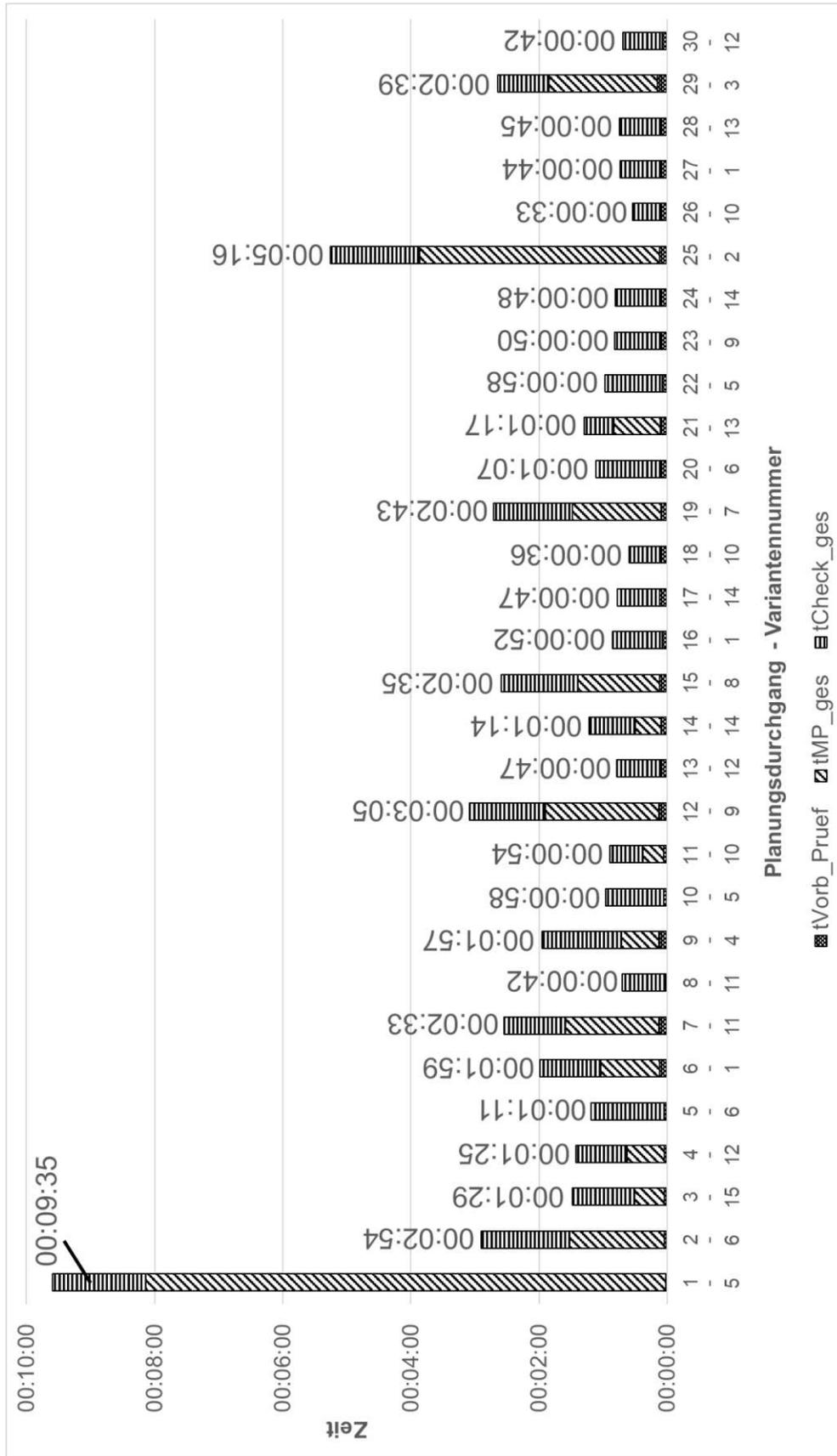
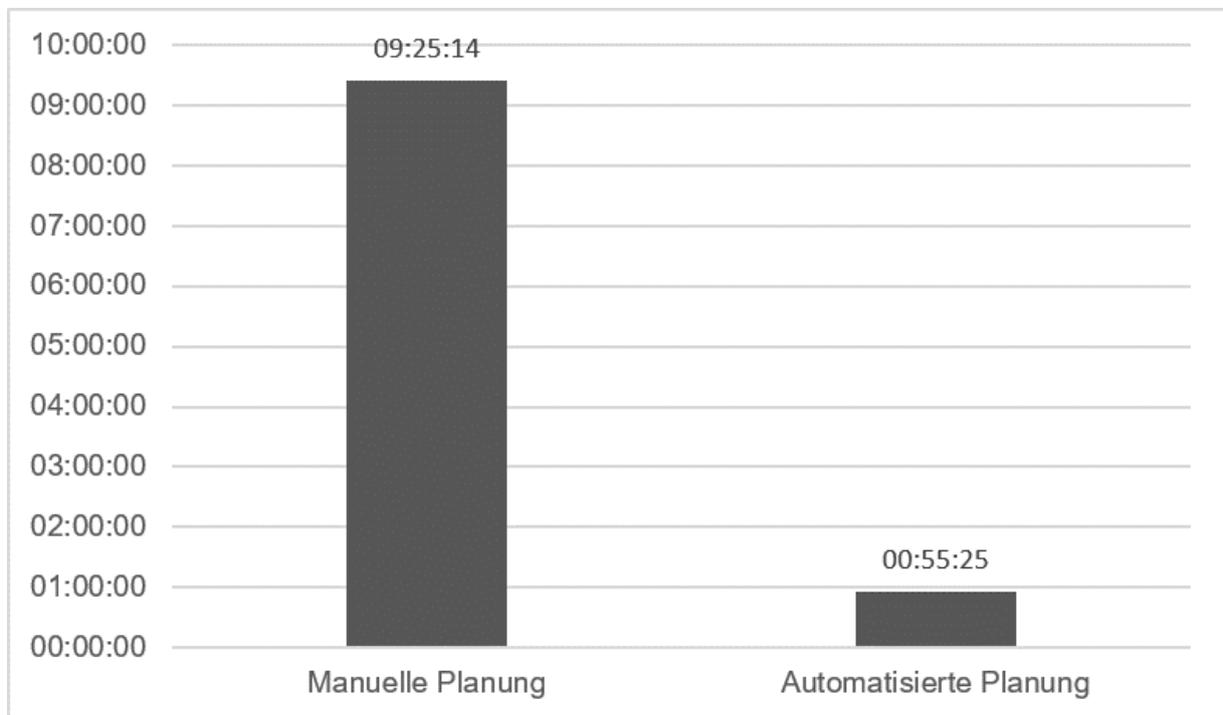


Abbildung 24: Zeitliche Aufwände, bei automatisierter Informationsversorgung mit Software-Artefakt

### Vergleich der manuellen und automatisierten Informationsversorgung:

In nachfolgender Abbildung 25 werden die Ergebnisse der beiden Methoden zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme gegenübergestellt:



**Abbildung 25: Vergleich der zeitlichen Gesamtaufwände über 30 Planungsdurchgänge**

Während die 30 Planungsdurchläufe bei manueller Planung eine Gesamt-Dauer von 9 Stunden und 25 Minuten aufweist, konnte durch Anwendung des Vorgehensmodells bzw. des implementierten Software-Artefakts dieser Zeit-Aufwand auf 55 Minuten gesenkt werden. Die erforderliche Planungszeit konnte daher bei Nutzung des Software-Artefakts um 90% gesenkt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass bei erhöhtem Planungsumfang (zum Beispiel größerer Teileanzahl) die Zeitersparnis weiter anwächst. Dies konnte im Zuge der Validierung bereits bei kleinen Schwankungen der Teileanzahl beobachtet werden. Somit ist davon auszugehen, dass der Zusammenhang zwischen Planungsumfang und Zeitersparnis höherer Ordnung ist. Eine weitere Studie mit Fokus auf die Bauteileanzahl wäre erstrebenswert. Weiters waren die Qualitätsunterschiede bei jeder Methode nahezu gleich. Eine Einschränkung bei der automatisierten Planung ist, dass zuvor bereits eine ähnliche Produktvariante zumindest einmal geplant werden musste, um Montageanleitungen für weitere Varianten anhand von Ähnlichkeiten abzuleiten. Das implementierte Software-Artefakt wurde im Zuge der Validierung auch nach qualitativen Kriterien bewertet, also den erzeugten Anleitungselementen, der Benutzerfreundlichkeit der Anwendungsoberfläche sowie der subjektiv empfundenen

Komplexität des Software-Artefakts. Im durchgeführten Fallbeispiel wurden Montageanleitungen für das Produkt Modell-LKW automatisiert erstellt und in die industrielle Werkerführungssoftware ELAM von Armbruster Engineering übertragen.



Abbildung 26: Automatisiert generierte Anleitung, abgebildet in der Verwaltungs-Oberfläche (Backend) einer industriellen Werkerführungssoftware

Nachfolgende Abbildung 26 zeigt das Ergebnis in der Verwaltungs-Oberfläche (Backend) der Werkerführung. Zu sehen sind ein automatisch generierter Beschreibungstext (Position 1 im Bild) und ein automatisiert generierter Screenshot als virtuelle Werkerinformation (Position 2 im Bild) zur Visualisierung der im aktuellen Montageschritt zu montierenden Bauteile. Weiters werden Verknüpfungsdaten zur Einbindung eines intelligenten Schraubwerkzeugs automatisiert erstellt und eingetragen (Position 3 im Bild), sodass ein Schraubwerkzeug mit den erforderlichen Drehmomentdaten versorgt und das Schraubergebnis gemessen und dokumentiert wird.

Zur Bewertung der Benutzerfreundlichkeit sowie subjektiv empfundenen Komplexität der Anwendung wurde der 1995 von LEWIS entwickelte und veröffentlichte Fragebogen zur Bestimmung der System Usability Scale (SUS) herangezogen (J.R. Lewis 1995). Nach der Anwendung des Software-Artefakts wurden den einzelnen Anwendern jeweils 10 Fragen gestellt, welche likert-skaliert von 1 bis 5 bewertet wurden. In Tabelle 6 ist eine Legende der Antworten der durchgeführten SUS-Befragung dargestellt.

**Tabelle 6: Legende der Antworten der durchgeführten SUS-Befragung**

1	2	3	4	5
<b>Stimme zu</b>	<b>Stimme eher zu</b>	<b>Neutral</b>	<b>Stimme eher nicht zu</b>	<b>Stimme nicht zu</b>

In nachfolgender Abbildung 27 sind die gemittelten Ergebnisse der einzelnen Fragen des SUS-Fragebogens dargestellt:

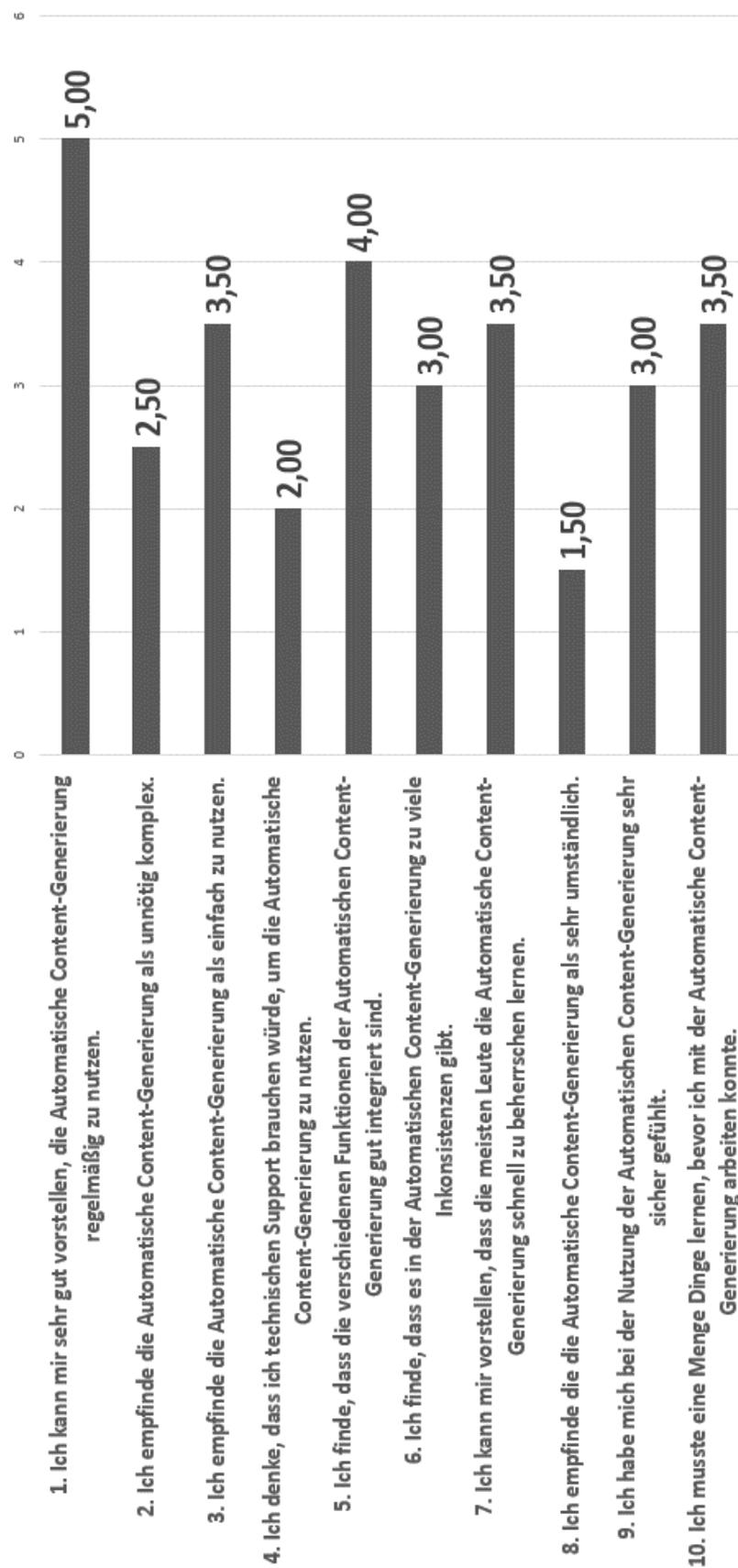


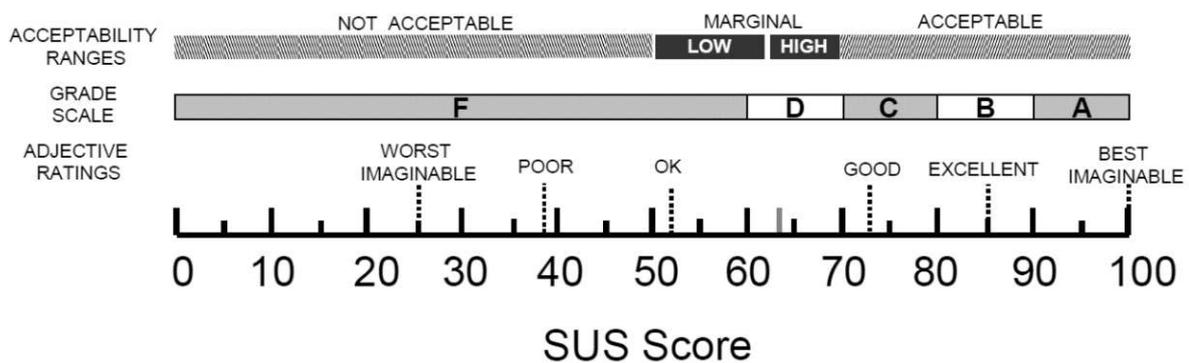
Abbildung 27: Ergebnisse des SUS-Fragebogens im Überblick

Gesamt ergibt sich somit eine SUS-Bewertung von 66,3 bei einer Standardabweichung von 12,4.

**Tabelle 7: Ergebnisse der durchgeführten SUS-Befragung**

	Wert
<b>SUS Gesamtbewertung</b>	66,3
<b>Standardabweichung</b>	12,4
<b>Stichprobengröße</b>	2 Personen

Eine SUS Gesamtbewertung von 66,3 wird von Bangor et. al mit den Adjektiven „OK“ bis „Gut“, dem Akzeptanzwert „Marginal High“ (dt. „Übergangsbereich, eher akzeptabel“) sowie der Schulnote „D“ bewertet. Diese tendenziell grenzwertige Einordnung ist darauf zurückzuführen, dass im aktuellen Software-Prototyp ein starker Fokus auf die Umsetzung der angeforderten Funktionen gelegt wurde und Benutzerdesign sowie damit einhergehende Benutzerfreundlichkeit im Zuge des Customizings an zukünftige Unternehmen erst angepasst und optimiert werden.



**Abbildung 28: Einordnung der SUS-Gesamtbewertung hinsichtlich der Adjektivbewertungen, Akzeptanzwerte und Schulnotenskalen (Grafik direkt übernommen aus (Bangor et al. 2009))**

In einem weiteren Schritt wurden Anwendende des Software-Prototyps im Zuge der SUS-Befragung nach Auffälligkeiten in der Benutzung sowie Verbesserungsvorschlägen für eine zukünftige Weiterentwicklung sowie Industrialisierung befragt. Die Ergebnisse dieser Befragung werden näher erläutert:

In drei von insgesamt 60 durchgeführten Planungsläufen (manuell sowie automatisiert) wurden einzelne Bauteile vergessen, sodass diese nicht in den Prozess eingeordnet wurden und damit auch nicht in den erstellten Anleitungen aufschienen. Dies hat ausschließlich Normteile wie Schrauben, Mutter oder Scheiben mit geringen

geometrischen Abmaßen betroffen. Eine mögliche Lösung zur Vorbeugung dieser Fehlerquelle ist eine Auflistung aller offenen Bauteile, welche von Anwendern vor Abschluss der Planung geprüft und bestätigt werden.

Werden bereits verplante Bauteile wieder aus dem Prozess entfernt, werden diese anschließend weiterhin als bereits verplant visualisiert und farblich hervorgehoben. Dieser Fehler ist zu vernachlässigen, weil im nachfolgenden Ereignis der Löschung eines Bauteils automatisch die fehlerhafte Visualisierung aktualisiert und somit korrigiert wird.

Der Algorithmus zum fallbasierten Schließen eines früheren Planungsauftrags auf den aktuellen Planungsauftrag führte in fünf Fällen zu einem Vorschlag, welche laut Anwenderin beziehungsweise Anwender nicht einer optimalen Planungsvariante entspricht und somit manuell zu korrigieren sind. Dieser Punkt wird durch eine bessere Anpassung der einzelnen Gewichtungen sowie Toleranzen beim Anlernen des Algorithmus korrigiert beziehungsweise vermindert.

Weiters wurde angemerkt, dass Änderungen am 3D-CAD-Modell, wie beispielsweise geometrische Änderung der Position von Bauteilen oder Umbenennung von Bauteilen, nicht in die automatisch erzeugten Anleitungen übernommen werden. Dies stellt jedoch ein beabsichtigtes Verhalten der Anwendung dar. Dennoch sollte in zukünftigen Weiterentwicklungen eine Möglichkeit geschaffen werden, Änderungen am 3D-CAD-Modell durchzuführen, sofern dies von der jeweiligen Entwicklungsabteilung freigegeben und kommuniziert wird.

### 6.3 Kritische Reflexion und Zusammenfassung

Die zugrunde gelegte forschungsleitende Methode Design Science Research Methodology erfordert nach Design, Entwicklung und Demonstration eine rigorose Validierung des entwickelten Artefakts. Das entwickelte Vorgehensmodell wurde in Form eines softwarebasierten Prototyps implementiert und dessen Einsatz im Zuge eines Fallbeispiels innerhalb der Laborumgebung der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 demonstriert. Plattform, graphische Benutzeroberflächen und Schnittstellen des Artefakts wurden dabei in Form von Komponentendiagrammen und Bildern der Benutzeroberfläche dargestellt. Die Integration erforderte zusätzlich die Entwicklung eines Postprozessor-Moduls zur automatisierten Eintragung generierter Werkerinformationen in ein in oben genannter Pilotfabrik vorliegendes Werkerführungssystem. Das Vorgehensmodell wurde durch die Anwendung in einem Fallbeispiel validiert. Dabei wurden zunächst die Zielsetzungen sowie die methodische Vorgehensweise erläutert. Ein visuelles Werkerführungssystem wurde anhand des

Beispielprodukts Modell-LKW in 15 verschiedenen Produktvarianten jeweils manuell ohne Software-Artefakt und automatisiert mit Software-Artefakt mit Informationen versorgt. Dabei wurden die einzelnen anfallenden zeitlichen Aufwände gemessen und übersichtlich dargestellt. Dabei konnte eine zeitliche Einsparung von 90% durch Einsatz des Software-Artefakts nachgewiesen werden, welches das entwickelte Vorgehensmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme anwendet.

Nachfolgend erfolgt eine kritische Validierung der in Abschnitt 4.2 gestellten Anforderungen an das Vorgehensmodell beziehungsweise an das implementierte Software-Artefakt. Bei der Validierung der Anforderungen wird jeweils auf die realisierten Funktionen sowie die Ergebnisse des Fallbeispiels hingewiesen. Jede Anforderung wird zusätzlich hinsichtlich ihres Erfüllungsgrades bewertet: (a) Anforderung erfüllt, (b) Anforderung teilweise erfüllt sowie (c) Anforderung nicht erfüllt.

**Anforderung 1 – Gängige Informationsausgabearten in Montageprozessen unterstützen (Benutzeranforderung):** Die durch das Software-Artefakt automatisiert erstellten Anleitungen decken den auftretenden Informationsbedarf der Werker teilweise ab, wobei hierbei auf die wichtigsten Informationen im Montageprozess Bezug genommen wird, wie beispielsweise Montagereihenfolge, zu verwendende Werkzeuge und mögliche Fehlerquellen. Es werden die beiden gängigsten Informationsausgabearten der textuellen Beschreibung sowie Bilder unterstützt, wobei Animationen im derzeitigen Entwicklungsstand nicht automatisiert generiert werden. Die Anforderung 1 ist somit teilweise erfüllt.

**Anforderung 2 – Bestehendes Wissen wiederverwenden (Funktionale Anforderung):** Das entwickelte Software-Artefakt ist in der Lage, bestehendes Wissen wiederzuverwenden, um damit den Planungsprozess des Anwenders optimal zu unterstützen. Dabei wird sowohl auf bestehendes Produktwissen zurückgegriffen, kodiert in Form von 3D-CAD-Modellen und Stücklisten, als auch Prozesswissen von früheren durchgeführten Montageplanungsläufen wiederverwendet, indem durch die Methode des fallbasierten Schließens Prozesspläne von früher geplanten, ähnlichen Produktvarianten aus einer Fallbasis identifiziert, angepasst und wiederverwendet wird. Ebenso wird bestehendes Wissen über verfügbare Ressourcen, wie beispielsweise Werkzeuge oder sonstige Hilfsmittel, in Form von Stammdaten miteinbezogen. Die Anforderung 2 ist somit erfüllt.

**Anforderung 3 – Fehlendes Wissen ist über Benutzerschnittstellen in den Erstellungsprozess miteinzubringen (Benutzeranforderung):** Anwendende des

Software-Artefakts haben die Möglichkeit, über eine graphische Benutzeroberfläche fehlendes Wissen in den Erstellungsprozess der Anleitungen miteinzubringen. Hier unterstützt das Software-Artefakt dabei, indem Routineaufgaben übernommen oder Schraubwerte vorgeschlagen werden. Die Benutzeroberfläche unterstützt weiters das Laden von 3D-Modellen, ermöglicht eine Definition von Montageschritten, eine Prüfung der Montagereihenfolge sowie einen Export des eingebrachten Wissens über ein definiertes Format. Anforderung 3 ist somit erfüllt.

**Anforderung 4 – Anpassung der zu erstellenden Informationen hinsichtlich der Erfahrung des Informationskonsumenten (Funktionale Anforderung):** Das implementierte Software-Artefakt ist in der Lage, zwei unterschiedliche Versionen der Instruktions-Texte zu erstellen: (a) Instruktionstext mit minimalen Informationen wie dem Prozess, der Bauteilbezeichnung und einer kurz gehaltenen Formulierung, sowie (b) Instruktionstext mit zusätzlichen Informationen wie beispielsweise zu verwendende Werkzeuge, Hilfsstoffe und einer längeren Formulierung. Die Montage-Mitarbeiterin beziehungsweise der Montage-Mitarbeiter (Informationskonsument) wählt eigenständig, welche Version über die visuelle Werkerführung auszugeben ist, sodass sich der Informationsgehalt an ihre beziehungsweise seine Erfahrung anpasst. Da eine Entscheidung über die zu wählende Version von der Montage-Mitarbeiterin beziehungsweise dem Montage-Mitarbeiter selbst gewählt wird und nicht automatisiert erfolgt, ist Anforderung 4 nur teilweise erfüllt.

**Anforderung 5 – Anpassung der zu erstellenden Informationen auf gewünschtes Ausgabegerät und Darstellungsform (Funktionale Anforderung):** Die automatisiert erstellten Instruktionssinformationen weisen eine hohe Anpassungsfähigkeit hinsichtlich der Ausgabeform auf, wie beispielsweise gewünschtes Ausgabegerät und Darstellungsform. Es sind somit Anleitungen für visuelle Werkerführungssysteme sowohl für größere Touch-Bildschirme, mobile Tablets, als auch kleine Bildschirme wie beispielsweise Smartphone automatisiert erstellbar. Da die Herausforderungen bzgl. der Lesbarkeit von Informationen zu einem großen Teil von der Darstellung in der verwendeten visuellen Werkerführungslösung abhängen und die Erstellung der Informationen hier keinen Einfluss hat, gilt Anforderung 5 als erfüllt.

**Anforderung 6 – Hohe Qualität der erstellten Werkerinformationen (Benutzeranforderung):** Die Effektivität des Artefakts ist unter anderem über die Qualität der automatisiert generierten Informationen zu beurteilen. Die erstellten Werkeranleitungen wurden im Fallbeispiel im Zuge eines Interviews der teilnehmenden Personen hinsichtlich Einfachheit, Verständlichkeit und Korrektheit

geprüft. Dabei waren die erstellten Anleitungselemente im visuellen Werkerführungssystem grundsätzlich zur Anleitung von Mitarbeitenden geeignet, es wurde jedoch angemerkt, dass gegebenenfalls zusätzliche Informationen hilfreich wären, um Rückfragen zu vermeiden. Anforderung 6 gilt somit teilweise als erfüllt.

### Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des Vorgehensmodells:

Nachfolgend werden im Zuge einer SWOT-Analyse die Stärken und Schwächen (unternehmensinterne Analyse) sowie Chancen und Risiken (unternehmensexterne Analyse) diskutiert (Bruhn et al. 2019) und daraus Maßnahmen für die weitere Entwicklung abgeleitet. Nachfolgende Abbildung 29 gibt einen Überblick über die identifizierten Stärken (S), Schwächen (W), Chancen (O) und Risiken:

<p style="text-align: center;"><b>Stärken (S)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Automatisierungsgrad im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme</li> <li>• Bestehendes Wissen aus produktbeschreibenden Daten wiederverwenden</li> <li>• Kein physischer Prototyp erforderlich</li> <li>• Gleichbleibende Informationsqualität der Anleitungselemente (Texte, Bilder)</li> <li>• Anleitungselemente an Erfahrungsgrad des Informationskonsumenten anpassbar</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Schwächen (W)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Anforderungen an die Qualität der produktbeschreibenden Daten</li> <li>• Produktionsorientierte Struktur (MBOM) erforderlich</li> <li>• Integration mit PLM oder ERP Systeme erforderlich</li> <li>• Automatische Erstellung ist auf virtuelle Werkerinformationen (Texte, Screenshots, 3D-CAD-Teilmodelle) beschränkt</li> <li>• Reale Werkerinformationen (Foto- und Videoaufnahmen) sind manuell zu erstellen</li> <li>• Starre Gewichtungen und Toleranzen für Methode des „Fallbasierten Schließens“</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Chancen (O)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitarbeitende durch variantengenaue Montageanleitungen unterstützen bzw. kognitiv entlasten</li> <li>• Reduktion von Fehlern in der Montage</li> <li>• Automatisiertes Einlernen neuer Mitarbeitender</li> <li>• Montageplaner werden von unterfordernden Routinetätigkeiten befreit</li> <li>• Ableitung von groben Vorgabezeiten zur überschlägigen Montagetaktung</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Risiken (T)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgabe falscher Anleitungen an das Werkerführungssystem, wenn diese zuvor nicht überprüft wurden</li> <li>• Fehlende Datenbasis bei produktbeschreibenden Daten führt zu fehlender Anwendbarkeit des Systems</li> <li>• Hohe Kosten und Aufwände für den Aufbau von Schnittstellen zu Fremdsystemen (ERP, MES, PLM, ...)</li> <li>• Technische Abhängigkeit vom Software-Artefakt zur Informationsversorgung steigt zunehmend</li> </ul>

**Abbildung 29: Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten SWOT-Analyse**

Das entwickelte Vorgehensmodell ermöglicht die Erstellung sowie Eintragung von Werkerinformationen für visuelle Werkerführungssysteme und weist dabei einen hohen Automatisierungsgrad auf. Dies ist vorrangig darauf zurückzuführen, dass manuelle Routinetätigkeiten automatisiert werden und auf bestehendes Wissen zurückgegriffen wird, welches in produktbeschreibenden Daten hinterlegt ist oder aus früheren Planungsdurchgängen wiederverwendet wird. Im Gegensatz zur gängigen Methodik in der Industrie, ist dafür zum Planungszeitpunkt kein physischer Prototyp erforderlich, sodass es möglich wird, den Informationsversorgungsprozess bereits in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses anzustoßen, ohne laufende Produktionsprozesse zu stören. Diese Stärke ermöglicht es, Probleme im

Montageprozess schon frühzeitig zu erkennen und konstruktive sowie prozessbezogene Anpassungen anzustoßen. Das Vorgehensmodell ermöglicht eine Erstellung von Werkerinformationen, welche auf Grund von hinterlegten Regeln (z.B. Textbausteine mit Platzhaltern, siehe Abschnitt 5.3) standardisiert sind und somit eine annähernd gleichbleibende Informationsqualität gewährleisten. Unter anderem werden Bilder aus definierten Winkeln oder Entfernungen erstellt und Texte generiert, welche eine an den Erfahrungsgrad des Informationskonsumenten (Werker) angepasste Informationstiefe aufweisen.

Um einen hohen Automatisierungsgrad in der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme zu ermöglichen, muss das zu montierende Produkt in einer definierten Form sowie mit hinreichender Datenqualität beschrieben sein. Eine Schwäche ist hierbei, dass das Vorgehensmodell ein produktbeschreibendes 3D-CAD-Modell erfordert, welches eine montagegerechte Bauteilstruktur (MBOM, siehe Abschnitt 2.3.3) aufweist. Sollte diese nicht vorliegen, sind Maßnahmen zu treffen, um eine Überführung der konstruktionsorientierten Struktur (EBOM) in eine produktionsorientierte Struktur (MBOM) zu ermöglichen. Dies erfordert einen zusätzlichen zeitlichen oder finanziellen Aufwand. Damit Anweisungstexte automatisch erstellt und in einfach zu lesender Form an den Informationskonsumenten ausgegeben werden, hat das 3D-CAD-Modell nicht nur Teilenummern, sondern verständliche Bauteilbezeichnungen zu enthalten. Alternativ sind diese jedoch auch aus einem weiteren Informationssystem, wie zum Beispiel einem PLM oder ERP System zu extrahieren, wodurch jedoch zunächst eine Integration dieser Systeme mit dem entwickelten Software-Artefakt erforderlich ist. Sind diese beschriebenen 3D-CAD-Daten nicht vorhanden, ist keine automatische Erstellung möglich oder die Qualität des Planungsprozesses sowie der Planungsergebnisse sinkt. Das Vorgehensmodell deckt ausschließlich eine automatische Erstellung von virtuellen Werkerinformationen (Screenshots, Texte) ab, während reale Werkerinformationen (Foto- und Videoaufnahmen) manuell zu erstellen sind und einen entsprechenden zeitlichen Aufwand erfordern. Diese Schwäche wird durch eine Maßnahme in Form einer mobilen Applikation gemindert, welche sowohl Aufnahme als auch Übertragung in die Datenbank des Software-Artefakts über eine webbasierte, mobile Applikation ermöglicht und somit bei Vorhandensein eines physischen Produkt-Prototyps zumindest den erforderlichen zeitlichen Aufwand sowie mögliche Fehler bei der Zuordnung reduziert. Das Vorgehensmodell verwendet Methoden des fallbasierten Schließens, welche wiederum auf Algorithmen zur Ableitung von Ähnlichkeiten zwischen Baugruppen und Bauteilen basiert. Diese Algorithmen erfordern eine manuelle Festlegung von Gewichtungen sowie Toleranzen der einzelnen

Ähnlichkeitsfaktoren. Für ein optimales Ergebnis sind diese Gewichtungen und Toleranzen für jede Produktfamilie beziehungsweise für jedes Unternehmen in Versuchen individuell zu konfigurieren und zu prüfen, wodurch zeitliche sowie finanzielle Aufwände entstehen. Eine mögliche Maßnahme ist hierbei eine automatische Anpassung der Gewichtungs- sowie Toleranz-Faktoren, basierend auf früheren Planungsdurchgängen.

Das entwickelte Vorgehensmodell bietet anwendenden Unternehmen die Chance, ihre Mitarbeitenden bei der Montage von hochvarianten Produkten bis zu Losgröße 1 durch die Ausgabe von variantengenauen Anleitungen zu unterstützen. Somit wird auf aktuelle Tendenzen des Marktes besser eingegangen, indem kleinere Losgrößen annähernd zu Serienbedingungen produziert und Fehler vermieden werden. Zudem wird eine automatisierte Erstellung von Anleitungen für das Einlernen neuer Mitarbeiterinnen beziehungsweise Mitarbeiter ermöglicht, sodass diese höhere Lerneffekte erzielen und negative Effekte der Fluktuation durch beschleunigte Ausbildungsprozesse leichter ausgeglichen werden. Hervorzuheben ist weiters, dass zukünftig bei zunehmender Frequenz der Planungsdurchgänge eine kognitive Unterforderung von Mitarbeitenden der Montageplanung droht, welche beispielsweise zu Demotivation und Leistungsabfall führt. Durch eine automatisierte Erstellung von Werkerinformationen sind diese Mitarbeitenden hingegen in der Lage, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren und belastende Routinetätigkeiten dem Softwaresystem zu überlassen. Eine weitere Chance, welche sich durch die Anwendung der Vorgehensmodells zur automatisierten Informationsversorgung bietet, ist neben einer Erstellung von Anleitungen ebenso eine Ableitung von Vorgabezeiten. Da Anleitungen einem detaillierten Informationsgrad zuzuordnen sind (also sehr genau beschreiben, was sowie wie etwas zu tun ist) ist es durch eine Kombination mit Systemen vorbestimmter Zeiten möglich, Vorgabezeiten für einzelne manuelle Montageschritte abzuleiten und bereits in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses Aussagen über Taktung sowie Montagemethode zu treffen.

Ein mögliches Risiko, welches sich durch eine dauerhafte Anwendung des Vorgehensmodells ergibt, ist, dass ein zu hohes Vertrauen in die Qualität der automatisch erstellten Anleitungen gesetzt wird und der letzte Schritt des Vorgehensmodells („Prüfen, ob alle Werkerinformationen korrekt sind“) nicht oder nur vereinzelt ausgeführt wird. Werden Anleitungen automatisch erstellt, jedoch nicht auf ihre Korrektheit überprüft, besteht das Risiko, dass falsche Anleitungen über ein visuelles Werkerführungssystem an den Informationskonsumenten ausgegeben werden. Dies führt zu hohen Fehler- beziehungsweise Nacharbeitskosten und es

besteht das Risiko, das Vertrauen der Kunden nachhaltig zu schädigen. Um dieses Risiko zu minimieren, ist der letzte Schritt des Vorgehensmodells (Prüfen ob Werkerinformationen korrekt sind) bei jedem Planungsdurchgang auszuführen und systematisch abzusichern. Eine automatische Informationsversorgung mit dem beschriebenen Vorgehensmodell ist nur dann möglich, wenn erforderliche Daten wie beispielsweise produktbeschreibende 3D-CAD-Modelle zur Verfügung gestellt werden. Es besteht das Risiko, dass dies aus Datenschutzbedenken oder auf Grund einer fehlenden Datenbasis nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, somit keine Anwendung des Vorgehensmodells plausibel ist und das Anwenderunternehmen auf konventionelle bzw. manuelle Methoden zurückzugreifen muss. Damit dies vermieden wird, ist frühzeitig auf das Vorhandensein dieser Daten zu achten und zum Beispiel bereits im Angebotsprozess gegenüber Kundinnen zu kommunizieren (Abnehmer der zu montierenden Produkte). Ein weiteres Risiko besteht bei der Integration mit umliegenden Informationssystemen, wie beispielsweise ERP-, PLM- oder ME-Systemen. Sofern eine erforderliche Schnittstelle nicht oder nur durch eine hohe finanzielle Investition zu realisieren ist, fehlt die Datengrundlage bzw. die Verbindung zum verwendeten visuellen Werkerführungssystem, wodurch das Vorgehensmodell nicht anwendbar ist. Dies erfordert ebenso eine frühzeitige Klärung der Rahmenbedingungen sowie Realisierbarkeit und hat in enger Kommunikation mit den jeweiligen Herstellern beziehungsweise Integratoren dieser Systeme zu erfolgen. Abschließend besteht das Risiko eines technischen Ausfalls des Software-Artefakts, sodass das Vorgehensmodell nicht anwendbar ist. Je nach Schwere sowie voraussichtlicher Dauer des Ausfalls sind Backup-Maßnahmen auszuarbeiten und anzuwenden, um die laufende Produktion nicht zu gefährden. Dies schließt unter anderem eine manuelle Erstellung von Werkerinformationen, regelmäßige Wartung sowie Backup von Daten ein.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick der Arbeit

Im Zuge dieser Arbeit wurde das Konzept der Automatisierung des Informationsversorgungsprozesses visueller Werkerführungssysteme definiert, in der Ausgestaltung eines Vorgehensmodells entwickelt und als Software-Artefakt implementiert sowie validiert. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen. Dabei werden die in Abschnitt 3.3 definierten Subzielsetzungen hinsichtlich ihrer Erfüllung überprüft und der zukünftige Forschungsbedarf (Ausblick) dargestellt.

### 7.1 Zusammenfassung

Eine vom Markt geforderte hohe Varianz sowie eine zunehmende Komplexität von Produkten bewirkt kleinere Losgrößen und zunehmend komplexere Produktionsprozesse. Dies führt zu einem erhöhten Unterstützungsbedarf bei der Durchführung von Montageprozessen, welcher beispielsweise durch den Einsatz visueller Werkerführungssysteme gewährleistet wird. In weiterer Folge kommt es dabei jedoch zu höheren Arbeitsvorbereitungsaufwänden, welche bei der Erstellung und Eintragung von Werkerinformationen anfallen. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Design Science Research Methodology als forschungsleitende Methode dieser Arbeit gewählt. Diese schafft neues Wissen durch das Entwerfen und Untersuchen von innovativen Artefakten, welche wiederum Methoden, Vorgehensmodelle, Prozessmodelle oder Instanzen davon sind. Um ein derartiges Artefakt zu entwickeln, wurde die Aufarbeitung theoretischer Grundlagen aus den Forschungsgebieten „Montagesysteme“, „Visuelle Werkerführungssysteme“, „Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme“ sowie eine Eingrenzung des Untersuchungsbereichs durchgeführt. Die Darstellung des Stands der Forschung zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme umfasst eine Übersicht allgemeiner, jedoch ähnlicher Forschungsvorhaben und Ansätze. Dabei wurde identifiziert, dass in der bisherigen Literatur keine ganzheitlichen Lösungen, Vorgehensmodelle oder Ansätze publiziert wurden, welche eine wesentliche Reduktion von manuellen Aufwänden im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme ermöglichen. Als Zielsetzung der Arbeit wurde somit definiert, ein Vorgehensmodell zur automatisierten Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme zu entwickeln und damit manuelle Aufwände im Informationsversorgungsprozess durch die Nutzung von analysierten Automatisierungspotenzialen zu senken. Nach Ableitung der Anforderungen an das zu entwickelnde Artefakt erfolgte die Entwicklung der Theorie, welche diese Arbeit beiträgt und eine Automatisierung im Kontext der Informationsversorgung visueller

Werkerführungssysteme beschreibt. Dabei wurden Potenziale für eine Automatisierung von Arbeitsvorbereitungstätigkeiten sowie Assistenz des Montageplaners identifiziert und anhand eines zuvor erarbeiteten manuellen Informationsversorgungsprozess sowie mathematischen Modells quantifiziert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden in ein Vorgehensmodell, bestehend aus den Teilartefakten Prozessmodell sowie zugehöriges Informationsmodell, überführt und als Software-Artefakt prototypisch implementiert. Zur Untersuchung des entwickelten Artefakts wurde dabei die Validierung anhand eines Fallbeispiels durchgeführt, welche eine Reduktion von manuellen Aufwänden um 90% im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme nachweisen konnte. Durch Automatisierung ist es möglich, nicht-wertschöpfende Stützleistungsanteile zu vermindern, jedoch wertschöpfende Nutzleistungsanteile zu erhöhen und so einen Beitrag zu leisten, um visuelle Werkerführungssysteme selbst bei kleinsten Losgrößen wirtschaftlich sinnvoll einsetzen zu können.

## 7.2 Diskussion der Ergebnisse

Nachfolgend wird die Erfüllung der Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit diskutiert:

*Subzielsetzung 1: Identifikation der technischen, organisatorischen und benutzerorientierten Anforderungen an ein Vorgehensmodell im industriellen Umfeld, um zeitliche Aufwände in der Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme signifikant zu senken.*

Die Anforderungen an das Vorgehensmodell wurden in Abschnitt 4.2 dargelegt. Diese wurden aus der Literatur sowie durch Gespräche mit potenziellen Anwendern von fünf Produktionsunternehmen abgeleitet und in Geschäfts-, System-, Benutzer- und funktionale Anforderungen eingeteilt. Diese umfassen eine Erstellung gängiger Informationsausgabearten in der Montage sowie eine Wiederverwendung bestehenden Wissens aus früheren Planungsprozessen. Fehlendes Wissen wird über Benutzerschnittstellen in den Erstellungsprozess miteingebracht und eine Anpassung der zu erstellenden Informationen auf unterschiedliche Ausgabemodalitäten sowie in Abhängigkeit von der Erfahrung der Montageausführenden wird gewährleistet. Ebenso sollen die erstellten Werkerinformationen eine hohe oder zumindest gleichbleibende Informationsqualität wie bei einer manuellen Erstellung aufweisen.

*Subzielsetzung 2: Identifikation von Automatisierungsmöglichkeiten im aktuellen Prozess zur Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme zur Reduktion zeitlicher Aufwände in der Arbeitsvorbereitung.*

Identifizierte Automatisierungsmöglichkeiten im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme wurden in Abschnitt 5.2 dargestellt und näher beschrieben. Dazu wurde zuvor der manuelle Informationsversorgungsprozess erarbeitet und dabei anfallende zeitliche Aufwände durch ein mathematisches Modell modelliert. Die Ableitung von Automatisierungsmöglichkeiten erfolgte durch eine schrittweise Analyse des manuellen Informationsversorgungsprozess. In Kapitel 6.2 erfolgte eine Überprüfung der Automatisierungspotenziale durch die Bearbeitung eines Fallbeispiels, welche im untersuchten Fall eine Aufwandsreduktion von 90% nachgewiesen hat.

*Subzielsetzung 3: Definition von Merkmalen und Ausprägungen, welche ein Vorgehensmodell aufzuweisen hat, um zeitliche Aufwände für die Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme unter Nutzung von Algorithmen, Heuristiken, selbstlernenden Expertensystemen und Standardisierung signifikant zu senken.*

Die Darstellung der konzeptionellen Merkmale und Ausprägungen des Vorgehensmodells erfolgte in Kapitel 5. Durch das entworfene Vorgehensmodell wurden zuvor identifizierte Automatisierungspotenziale unter Nutzung von Algorithmen, Heuristiken und selbstlernenden Expertensystemen realisiert und dargestellt. Das dabei beschriebene Informationsmodell stellt die Speicherung der Daten und Informationen beziehungsweise Beziehungen der Informationsobjekte untereinander dar. Weiters erfolgte in Abschnitt 6.1 eine prototypische Implementierung des Vorgehensmodells als anwendbares und untersuchbares Software-Artefakt.

*Zielsetzung: Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines ganzheitlichen und durchgehenden Vorgehensmodells um zeitliche Aufwände manueller Informationsversorgungsprozesse visueller Werkerführungssysteme durch den gezielten Einsatz von Algorithmen, Heuristiken, selbstlernenden Expertensystemen und Standardisierung bei gleichbleibender Ergebnisqualität zu reduzieren.*

Es konnte gezeigt werden, dass durch das entwickelte Vorgehensmodell zeitliche Aufwände im Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme durch den gezielten Einsatz von Elementen der Automatisierung, wie beispielsweise Algorithmen, Heuristiken, selbstlernenden Expertensystemen sowie Standardisierung

gesenkt wurden. Im dargestellten Fallbeispiel konnte eine Reduktion der Planungszeit um 90% erzielt werden. Das gesetzte Ziel konnte somit erreicht werden.

Die damit einhergehende zielsetzungsorientierte Forschungsfrage lautete:

*Wie ist ein Vorgehensmodell im industriellen Umfeld zu gestalten, um zeitliche Aufwände im Informationsversorgungsprozessen visueller Werkerführungssysteme durch Automatisierung zu reduzieren?*

Das Vorgehensmodell wurde in Kapitel 5 konzeptioniert und entwickelt. Weiters wurden seine Bestandteile – Prozessmodell sowie Informationsmodell – formuliert und detailliert beschrieben. Eine nachfolgende Implementierung als Software-Artefakt sowie Demonstration und Validierung innerhalb eines Fallbeispiels ermöglichte eine Ableitung von Maßnahmen für eine zukünftige Gestaltung sowie zur Anwendung an realen Problemstellungen in Anwendungsunternehmen. Im Zuge dieser Arbeit entstand somit neues Wissen zum Informationsversorgungsprozess visueller Werkerführungssysteme, einer Automatisierung ebendieses Prozesses, der konzeptionellen Ausgestaltung und Implementierung eines Vorgehensmodells zur Nutzung dieser Automatisierung sowie der Auswirkungen auf Effizienz und Effektivität. Teilergebnisse wurden in Konferenz- sowie Journal-Beiträgen veröffentlicht (siehe Publikationsliste in Kapitel 12.2). Eine Publikation von Teilergebnissen der Forschungsarbeit entspricht der sechsten und letzten Phase des von PEFFERS et al. definierten Nominalprozesses zur Anwendung der Design Science Research Methodology (Peffer et al. 2007).

### 7.3 Ausblick

Im Kontext von visuellen Werkerführungssystemen – beziehungsweise ferner digitaler Assistenzsysteme – besteht in den kommenden Jahren ein nach wie vor hoher Bedarf an neuen und innovativen Ansätzen zur weiteren Verbesserung des Informationsversorgungsprozesses. In einer Vielzahl der derzeit durchgeführten Veröffentlichungen ist zu beobachten, dass insbesondere die Montageplanung im Fokus steht, darunter vor allem die automatische Montagereihenfolgenplanung. Hier gibt es aus Sicht des Autors einen wesentlichen Forschungsbedarf, um auch große und komplexe Produktvarianten in einem hinreichenden Gütegrad sowie mit vertretbarem Zeitaufwand automatisiert zu planen oder dem Montageplanungspersonal zumindest einen hilfreichen Vorschlag anzubieten. Aufgrund des erkennbaren Wandels konventioneller Montagesysteme zu cyberphysischen Montagesystemen sowie vermehrter Nutzung künstlicher Intelligenz im Produktionsumfeld ist weiterer Forschungsbedarf auf dem Gebiet der

automatisierten Informationsversorgung cyberphysischer Montagesysteme erforderlich. Dazu gehören neben visueller Werkerführungssysteme als Ausgabesysteme auch die Erstellung und Verknüpfung von Konfigurationssätzen für Geräte, Werkzeuge, Maschinen und Messmittel. Ein weiterer Ausgangspunkt für eine zukünftige Weiterentwicklung ist die Erweiterung des Anwendungsbereichs, so dass visuelle Werkerführungssysteme zukünftig auch im Bereich von Wartungs-, Rüst- und Serviceprozessen automatisiert mit Informationen versorgt werden.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz ist auch für ein gegenseitiges Lernen (Reciprocal Learning) zwischen Mensch und Maschine anwendbar. So lernen beispielsweise Maschinen beziehungsweise Algorithmen von Menschen (zum Beispiel Planungsmitarbeitende), wie Montageprozesse zu planen sind und wie zugehörige Arbeitsanweisungen für visuelle Werkerführungssysteme erstellt werden. Darüber hinaus sind Mitarbeitende in der Lage, von einer Maschine zu lernen, indem diese Hilfsinstruktionen eines visuellen Werkerführungssystems folgen. Eine Übertragung und Anpassung des im Zuge dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes zur Erstellung von Arbeitsplänen oder CNC-Werkzeugmaschinencode ist ebenfalls zu untersuchen und kann somit die Effizienz im Arbeitsvorbereitungsprozess von spanenden Werkzeugmaschinen erhöhen. Hier ist zu erwarten, dass insbesondere Ansätze des maschinellen Lernens eine manuelle Nachbearbeitung des erstellten CNC-Codes einsparen und dass das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell auf Grund der Ähnlichkeit zur etablierten CAD-CAM-CNC Kette mit geringem Anpassungsaufwand übertragbar ist.

## 8 Literaturverzeichnis

Aamodt, Agnar; Plaza, Enric (1994): Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. In: *AI Communications*, vol. 7, zuletzt geprüft am 24.05.2019.

Aehnelt, Mario; Bader, Sebastian (2014): Mobile Informationsassistentz für die Montage. In: *Erste transdisziplinäre Konferenz zum Thema „Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen“*, zuletzt geprüft am 21.02.2018.

Aehnelt, Mario; Bader, Sebastian (2015a): From Information Assistance to Cognitive Automation: A Smart Assembly Use Case. In: *ICAART 2015: Agents and Artificial Intelligence* 9494, S. 207–222. DOI: 10.1007/978-3-319-27947-3.

Aehnelt, Mario; Bader, Sebastian (2015b): Information Assistance for Smart Assembly Stations. In: *Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART-2015)*, S. 143–150. DOI: 10.5220/0005216501430150.

Aehnelt, Mario; Bader, Sebastian (2016): Providing and Adapting Information Assistance for Smart Assembly Stations. In: *SAI Intelligent Systems Conference 2016 (IntelliSys 2016)*, zuletzt geprüft am 21.02.2018.

Aehnelt M., Bader S. (2014): Tracking Assembly Processes and Providing Assistance in Smart Factories. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART)*, zuletzt geprüft am 12.03.2017.

Andersen, Rasmus; Ketelsen, Christopher; Nielsen, Kjeld; Andersen, Ann-Louise; Brunoe, Thomas D.; Bech, Sofie (2018): A Conceptual Digital Assistance System Supporting Manual Changeovers in High-Variety Production 536, S. 449–455. DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0\_56.

Ansari, Fazel; Hold, Philipp; Sihm, Wilfried (2018): Human-Centered Cyber Physical Production System: How Does Industry 4.0 impact on Decision-Making Tasks? In: *IEEE TEMSCON 2018*, zuletzt geprüft am 06.06.2018.

Ansari, Fazel; Schenkelberg, Kai; Seidenberg, Ulrich; Fathi, Madjid (2017): Problem-Solving in the Digital World: Synoptic Formalism, Incrementalism, and Heuristics 8, S. 1–9. DOI: 10.1081/E-ECST2-140000159.

Bach, Kerstin; Sauer, Christian; Althoff, Klaus Dieter; Roth-Berghofer, Thomas (2014): Knowledge Modeling with the Open Source Tool myCBR. In: *10th International Workshop on Knowledge Engineering and Software Engineering (KESE10) at the 21st European Conference on Artificial Intelligence*, zuletzt geprüft am 26.03.2019.

Bächler, Andreas; Bächler, Liane; Autenrieth, Sven; Behrendt, Hauke; Funk, Markus; Krüll, Georg et al. (2018): Systeme zur Assistenz und Effizienzsteigerung in manuellen Produktionsprozessen der Industrie auf Basis von Projektion und Tiefendatenerkennung 104, S. 33–49. DOI: 10.1007/978-3-662-49266-6\_3.

Backhaus, Julian; Hüttner, Stefan; Krug, Stefan; Reinhart, Gunther (2012): Wandlungsfähige Montagesysteme durch funktionsorientierte Modularisierung. In: *ZWF* 107 (5), S. 339–343. DOI: 10.3139/104.110756.

Bahubalendruni, M. Raju V.A.; Biswal, Bibhuti Bhusan (2016): A review on assembly sequence generation and its automation. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 230 (5), S. 824–838. DOI: 10.1177/0954406215584633.

Bahubalendruni, M. V. A. Raju; Biswal, Bibhuti Bhusan (2018): An Efficient Stable Subassembly Identification Method Towards Assembly Sequence Generation. In: *Natl. Acad. Sci. Lett.* 1 (2), S. 16. DOI: 10.1007/s40009-018-0679-1.

Bangor, A.; Kortum P.; Miller J. (2009): Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scal. In: *Journal of Usability Studies* (Vol. 4, Issue 3), S. 114–123, zuletzt geprüft am 30.08.2021.

Berger, Christoph; Zipfel, Alexander; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther (2019): Approach for an event-driven production control for cyber-physical production systems. In: *Procedia CIRP* 79, S. 349–354. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.085.

Bergmann, Ralph; Althoff, Klaus-Dieter; Minor, Mirjam; Reichle, Meike; Bach, Kerstin (2009): Case-Based Reasoning. Introduction and Recent Developments, zuletzt geprüft am 11.12.2018.

Berki, Eleni; Georgiadou, Elli; Holcombe, Mike (2004): Requirements Engineering and Process Modelling in Software Quality Management— Towards a Generic Process Metamodel. In: *Software Quality Journal* 12 (3), S. 265–283. DOI: 10.1023/B:SQJO.0000034711.87241.f0.

Bertram, Patrick; Birtel, Max; Quint, Fabian; Ruskowski, Martin (2018): Intelligent Manual Working Station through Assistive Systems. In: *IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 11*, zuletzt geprüft am 17.09.2018.

Bhattacharya, Bhaskar; Winer, Eliot (2015): A method for real-time generation of augmented reality work instructions via expert movements. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 9392*.

Biswas, Saroj Kr.; Sinha, Nidul; Purakayastha, Biswajit; Marbaniang, Leniency (2014): Hybrid expert system using case based reasoning and neural network for classification. In: *Biologically Inspired Cognitive Architectures 9*, S. 57–70. DOI: 10.1016/j.bica.2014.06.004.

Blattgerste, Jonas; Renner, Patrick; Pfeiffer, Thies (2019): Authorable augmented reality instructions for assistance and training in work environments. In: *MUM '19: Proceedings of the 18th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, S. 1–11. DOI: 10.1145/3365610.3365646.

Bornewasser, Manfred; Bläsing, Dominic; Hinrichsen, Sven (2018): Informatrische Assistenzsysteme in der manuellen Montage: Ein nützliches Werkzeug zur Reduktion mentaler Beanspruchung? In: *Z. Arb. Wiss.* 22 (1), S. 273. DOI: 10.1007/s41449-018-0123-x.

Brödner, Peter (1990): The Shape of Future Technology. The Anthropocentric Alternative. In: *Human-centred Systems, Springer London*, zuletzt geprüft am 04.11.2019.

Brough, John E.; Schwartz, Maxim; Gupta, Satyandra K.; Anand, Davinder K.; Kavetsky, Robert; Pettersen, Ralph (2007): Towards the development of a virtual environment-based training system for mechanical assembly operations. In: *Virtual Reality 11* (4), S. 189–206. DOI: 10.1007/s10055-007-0076-4.

Broy, Manfred (2010): Cyber-Physical Systems — Wissenschaftliche Herausforderungen Bei Der Entwicklung. In: *Cyber-Physical Systems. acatech DISKUTIERT, vol 0. Springer, Berlin, Heidelberg*, S. 17–31. DOI: 10.1007/978-3-642-14901-6\_2.

Bruhn, Manfred; Meffert, Heribert; Hadwich, Karsten (2019): Handbuch Dienstleistungsmarketing. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand. Hg. v. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, zuletzt geprüft am 01.10.2019.

Chen, Daqing; Burrell, Phillip (2001): Case-Based Reasoning System and Artificial Neural Networks: A Review. In: *NCA* 10 (3), S. 264–276. DOI: 10.1007/PL00009897.

Cho, Jullius; Vosgien, Thomas; Prante, Thorsten; Gerhard, Detlef (2016): KBE-PLM Integration Schema for Engineering Knowledge Re-use and Design Automation 492. DOI: 10.1007/978-3-319-54660-5.

Claeys, A.; Hoedt, S.; van Landeghem, H.; Cottyn, J. (2016): Generic Model for Managing Context-Aware Assembly Instructions. In: *IFAC-PapersOnLine* 49-12 (2016) 1181–1186, zuletzt geprüft am 08.11.2018.

Claeys, Arno; Hoedt, Steven; Schamp, Matthias; van de Ginste, Lauren; Verpoorten, Georges; Aghezzaf, El-Houssaine; Cottyn, Johannes (2019): Intelligent authoring and management system for assembly instructions, zuletzt geprüft am 17.01.2020.

Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E.; Rivest, Ronald L.; Clifford, Stein (2001): Introduction to algorithms. 2nd ed. Cambridge Mass.: MIT Press, zuletzt geprüft am 08.11.2018.

Danny, Paul; Ferreira, Pedro; Lohse, Niels; Guedes, Magno (2017): An AutomationML model for plug-and-produce assembly systems. In: *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, S. 849–854. DOI: 10.1109/INDIN.2017.8104883.

Dean, P. R.; Tu, Y. L.; Xue, D. (2009): An information system for one-of-a-kind production. In: *International Journal of Production Research* 47 (4), S. 1071–1087. DOI: 10.1080/00207540701543593.

Deshmukh, Abhijit S.; Banerjee, Ashis Gopal; Gupta, Satyandra K.; Sriram, Ram D. (2008): Content-based assembly search: A step towards assembly reuse. In: *Computer-Aided Design* 40 (2), S. 244–261. DOI: 10.1016/j.cad.2007.10.012.

Dini, G.; Santochi, M. (1992): Automated Sequencing and Subassembly Detection in Assembly Planning. In: *CIRP Annals* 41 (1), S. 1–4. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61140-8.

Dollinger C., Lock C., Reinhart G. (2016): Integration der Kompetenzentwicklung in die Montage mit Hilfe von Assistenzsystemen, zuletzt geprüft am 06.06.2018.

Dombrowski, Uwe; Wagner, Tobias; Riechel, Christoph (2013a): Analyse eines Konzepts zur Montageplanung auf Basis cyber-physischer Systemmodule. In: *ZWF Band 108 Ausgabe 5*, zuletzt geprüft am 13.11.2017.

Dombrowski, Uwe; Wagner, Tobias; Riechel, Christoph (2013b): Concept for a Cyber Physical Assembly System. In: *Assembly and Manufacturing (ISAM), 2013*, zuletzt geprüft am 13.11.2017.

Durão, Luiz Fernando; Haag, Sebastian; Anderl, Reiner; Schützer, Klaus; Zancul, Eduardo (2017): Development of a Smart Assembly Data Model. In: *IFIP Advances in Information and Communication Technology book series 517*, S. 655–666. DOI: 10.1007/978-3-319-72905-3\_58.

Dworschak, Bernd; Zaiser, Helmut (2014): Competences for Cyber-physical Systems in Manufacturing – First Findings and Scenarios. In: *Procedia CIRP 25*, S. 345–350. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.048.

Ebrahimi A.H., Åkesson K., Johansson P.E.C., Lezama T. (2016): Automated Analysis of Interdependencies Between Product Platforms and Assembly Operations. In: *Procedia CIRP 44*, S. 67–72. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.132.

Eng, Tiam-Hock; Ling, Zhi-Kui; Olson, Walter; McLean, Chuck (1999): Feature-based assembly modeling and sequence generation. In: *Computers and Industrial Engineering, Volume 36, Issue 1*, zuletzt geprüft am 24.07.2019.

European Commission (2021): Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. In: *EU publications*.

Fantini, Paola; Pinzone, Marta; Taisch, Marco (2018): Placing the operator at the centre of Industry 4.0 design. Modelling and assessing human activities within cyber-physical systems. In: *Computers & Industrial Engineering*. DOI: 10.1016/j.cie.2018.01.025.

Fantini P., Tavola G., Taisch M., Barbosa J., Leitao P., Liu Y., Sayed M.S., Lohse N. (2016): Exploring the integration of the human as a flexibility factor in CPS enabled manufacturing environments: methodology and results, zuletzt geprüft am 15.11.2017.

Fazio, Thomas L. de; Whitney, Daniel E. (1987): Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences. In: *IEEE Journal on Robotics and Automation* (Volume: 3, Issue: 6, December 1987), zuletzt geprüft am 24.07.2019.

Feldmann, Klaus; Lang, Stefan (2007): Effiziente Mitarbeiterinformation als Rationalisierungsansatz in der Produktion. In: *ZWF* 102 (11), S. 723–729. DOI: 10.3139/104.101208.

Feldmann K., Slama S., Gergs H.J., Wirth U. (2004): Planungsleitfaden zur Auslegung hybrider Montagesysteme. In: *Montage strategisch ausrichten - Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 171–200. DOI: 10.1007/978-3-642-18742-1\_13.

Fellmann, Michael; Robert, Sebastian; Büttner, Sebastian; Mucha, Henrik; Röcker, Carsten (2017): Towards a Framework for Assistance Systems to Support Work Processes in Smart Factories. In: *International Cross-Domain Conference for Machine Learning and Knowledge Extraction*, zuletzt geprüft am 16.04.2018.

Fischer, C.; Bönig, J.; Franke, J.; Lušić, M.; Hornfeck, R. (2015): Worker information system to support during complex and exhausting assembly of high-voltage harness. In: *5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, zuletzt geprüft am 05.11.2017.

Fischer, Christian; Lušić, Mario; Bönig, Jochen; Hornfeck, Rüdiger; Franke, Jörg (2014): Webbasierte Werkerinformationssysteme. Datenaufbereitung und -darstellung für die Werkerführung im Global Cross Enterprise Engineering, zuletzt geprüft am 05.11.2017.

Fischer, Christian; Lušić, Mario; Faltus, Florian; Hornfeck, Rüdiger; Franke, Jörg (2016): Integrating Workers' Feedback into Continuous Information Flows. Enabling Lean Quality Assurance by Worker Information Systems. In: *AMR* 1140, S. 435–442. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1140.435.

Fischer C., Lušić M., Faltus F., Hornfeck R., Franke J. (2016): Enabling Live Data Controlled Manual Assembly Processes by Worker Information System and Nearfield Localization System. In: *Procedia CIRP* 55, S. 242–247. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.013.

Franke, Jörg; Risch, Florian (2009): Effiziente Erstellung, Distribution und Rückmeldung von Werkerinformationen in der Montage. In: *ZWF Band 104 Ausgabe 10*, zuletzt geprüft am 15.03.2017.

Funk, Markus; Kosch, Thomas; Kettner, Romina; Korn, Oliver; Schmidt, Albrecht (2017): motionEAP: An Overview of 4 Years of Combining Industrial Assembly with Augmented Reality for Industry 4.0, zuletzt geprüft am 09.12.2017.

Funk, Markus; Lischke, Lars; Mayer, Sven; Shirazi, Alireza Sahami; Schmidt, Albrecht (2018): Teach Me How! Interactive Assembly Instructions Using Demonstration and In-Situ Projection. In: *Assistive Augmentation Cognitive Science and Technology*, zuletzt geprüft am 16.11.2017.

Gattullo, Michele; Scurati, Giulia Wally; Fiorentino, Michele; Uva, Antonio Emmanuele; Ferrise, Francesco; Bordegoni, Monica (2018): Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 56, S. 276–286. DOI: 10.1016/j.rcim.2018.10.001.

Geerts, Guido L. (2011): A design science research methodology and its application to accounting information systems research. In: *International Journal of Accounting Information Systems* 12 (2), S. 142–151. DOI: 10.1016/j.accinf.2011.02.004.

Gong, Liang; Li, Dan; Mattsson, Sandra; Åkerman, Magnus; Fast-Berglund, Åsa (2017): The Comparison Study of Different Operator Support Tools for Assembly Task in the Era of Global Production. In: *Procedia Manufacturing* 11, S. 1271–1278. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.254.

Gors, Dorothy; Birem, Merwan; Geest, Roeland de; Domken, Corentin; Zogopoulos, Vasilios; Kauffmann, Steven; Witters, Maarten (2021): An adaptable framework to provide AR-based work instructions and assembly state tracking using an ISA-95 ontology. In: *Procedia CIRP* 104, S. 714–719. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.120.

Gors, Dorothy; Puł, Jeroen; Vanherle, Bram; Witters, Maarten; Luyten, Kris (2020): Semi-automatic extraction of digital work instructions from CAD models. In: *Procedia CIRP* 97, S. 39–44. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.202.

Górski, Filip (2017): Building Virtual Reality Applications for Engineering with Knowledge-Based Approach. In: *Management and Production Engineering Review* 8 (4), S. 64–73. DOI: 10.1515/MPER-2017-0037.

Gu, P.; YAN, X. (1995): CAD-directed automatic assembly sequence planning. In: *International Journal of Production Research* 33 (11), S. 3069–3100. DOI: 10.1080/00207549508904862.

Gupta, Satyandra K. (2012): Overview of Assembly Modeling, Planning, and Instruction Generation Research at the Advanced Manufacturing Lab, zuletzt geprüft am 08.11.2018.

Haase, Tina; Termath, Wilhelm; Schumann, Marco (2015): Integrierte Lern- und Assistenzsysteme für die Produktion von morgen, zuletzt geprüft am 12.03.2017.

Hannola, Lea; Steinhüser, Melanie; Richter, Alexander; Schafler, Marlene; Lacueva-Perez, Francisco José (2018): Assessing the Impact of Digital Interventions on the Shop Floor, zuletzt geprüft am 13.03.2018.

Harari, Natalia Svensson; Bruch, Jessica; Jackson, Mats (2015): Mixed-Product Assembly Line: Characteristics and Design Challenges.

Harel, David; Feldman, Yishai (2004): Algorithmics. The Spirit of Computing (3rd. Edition), zuletzt geprüft am 03.06.2018.

Haug, Anders (2015): Work instruction quality in industrial management. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 50, S. 170–177. DOI: 10.1016/j.ergon.2015.09.015.

Heilala, Juhani; Helaakoski, Heli; Peltomaa, Irina (2008): Smart Assembly - Data and Model Driven, zuletzt geprüft am 13.11.2017.

Heiser, Julie; Phan, Doantam; Agrawala, Maneesh; Tversky, Barbara; Hanrahan, Pat (2004): Identification and Validation of Cognitive Design Principles for Automated Generation of Assembly Instructions. DOI: 10.1145/989863.

Herold, Miriam; Minor, Mirjam (2018): Ontology-based representation of workflows for transfer learning, zuletzt geprüft am 10.09.2018.

Hevner, A.; Chatterjee, S. (2010): Design Science Research in Information Systems 22, S. 9–22. DOI: 10.1007/978-1-4419-5653-8\_2.

Hevner, Alan R.; March, Salvatore T.; Park, Jinsoo; Ram, Sudha (2004): Design Science in Information Systems Research, zuletzt geprüft am 04.11.2017.

Hinrichsen, S.; Bendzioch, S.; Nikolenko, Alexander; Voss, Ernst (2018): Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen, zuletzt geprüft am 12.01.2019.

Hinrichsen S., Riediger D., Unrau A. (2016): Assistance Systems in Manual Assembly, zuletzt geprüft am 13.11.2017.

Höffler, Tim N.; Leutner, Detlev (2007): Instructional animation versus static pictures: A meta-analysis. In: *Learning and Instruction* 17 (6), S. 722–738. DOI: 10.1016/j.learninstruc.2007.09.013.

Hold, Philipp; Ranz, Fabian; Sihn, Wilfried; Hummel, Vera (2015): Durchblick im Variantenschungel. Visuelle Assistenzsysteme als Flexibilitätshebel auf dem Shop Floor.

Hold P., Ranz F., Sihn W. (2016): Konzeption eines MTM-basierten Bewertungsmodells für digitalen Assistenzbedarf in der cyber-physischen Montage. In: *Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation – Berlin*. DOI: 10.15358/9783800645466.

Homem de Mello, Luiz S.; Sanderson, Arthur C. (1991): A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. In: *IEEE Trans. Robot. Automat.* 7 (2), S. 228–240. DOI: 10.1109/70.75905.

Hou, Lei; Wang, Xiangyu; Bernold, Leonhard; Love, Peter E.D. (2013): Using Animated Augmented Reality to Cognitively Guide Assembly. In: *J. Comput. Civ. Eng.* 27 (5), S. 439–451. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000184.

Hu, S. J.; Ko, J.; Weyand, L.; ElMaraghy, H. A.; Lien, T. K.; Koren, Y. et al. (2011): Assembly system design and operations for product variety. In: *CIRP Annals* 60 (2), S. 715–733. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.004.

J.R. Lewis (1995): IBM computer usability satisfaction questionnaires: psychometric evaluation and instructions for use. In: *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 7 (1), S. 57–78.

Johansson, Pierre E.C.; Malmsköld, Lennart; Fast-Berglund, Åsa; Moestam, Lena (2018): Enhancing Future Assembly Information Systems – Putting Theory into Practice. In: *Procedia Manufacturing* 17, S. 491–498. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.088.

Jonas, Christian (2000): Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen, zuletzt geprüft am 21.02.2018.

Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes (2013): Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Securing the future of German manufacturing industry, zuletzt geprüft am 18.11.2017.

Kain, Saskia (2016): Entwickler von komplexen Mensch-Maschine-Systemen: Analyse des Einflusses von deren Leistungsdeterminanten auf den Entwicklungsprozess und das -ergebnis\_Saskia Kain, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Kaipa, Krishnanand; Morato, Carlos; Zhao, Boxuan; Gupta, Satyandra K. (2012): Instruction Generation for Assembly Operations Performed by Humans, S. 1121–1130. DOI: 10.1115/DETC2012-71266.

Kaipa, Krishnanand N.; Morato, Carlos W.; Liu, Jiashun; Gupta, Satyandra K. (2018): Toward Automated Generation of Multimodal Assembly Instructions for Human Operators 42, S. 885–897. DOI: 10.1007/978-3-319-62217-0\_62.

Kanai, S.; Takahashi, H.; Makino, H. (1996): ASPEN: Computer-Aided Assembly Sequence Planning and Evaluation System Based on Predetermined Time Standard. In: *CIRP Annals* 45 (1), S. 35–39. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63012-1.

Kärcher, Susann; Bauernhansl, Thomas (2019): Approach to Generate Optimized Assembly Sequences from Sensor Data. In: *Procedia CIRP* 81, S. 276–281. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.048.

Kardos, Csaba (2020): Integrated constraint- and geometric reasoning-based CAPP approach to mechanical assembly planning, zuletzt geprüft am 12.11.2020.

Kardos, Csaba; Kovacs, Andras; Pataki, Balasz E.; Vancza, Jozsef (2018): Generating Human Work Instructions from Assembly Plans, zuletzt geprüft am 31.10.2018.

Kardos, Csaba; Kovács, András; Váncza, József (2017): Decomposition approach to optimal feature-based assembly planning. In: *CIRP Annals* 66 (1), S. 417–420. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.002.

Kardos, Csaba; Váncza, József (2018a): Application of Generic CAD Models for Supporting Feature Based Assembly Process Planning. In: *Procedia CIRP* 67, S. 446–451. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.240.

Kardos, Csaba; Váncza, József (2018b): Mixed-initiative assembly planning combining geometric reasoning and constrained optimization. In: *CIRP Annals*. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.034.

Knöpfle, Christian; Weidenhausen, Jens; Chauvigne, Laurent; Stock, Ingo (2005): Template Based Authoring for AR based Service Scenarios. In: *IEEE Virtual Reality 2005*, zuletzt geprüft am 27.09.2017.

Koren, Yoram (2010): *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems (Wiley Series in Systems Engineering and Management)*, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Kovacs, Klaudia; Ansari, Fazel; Geisert, Claudio; Uhlmann, Eckart; Glawar, Robert; Sihn, Wilfried (2019): A Process Model for Enhancing Digital Assistance in Knowledge-Based Maintenance 9. DOI: 10.1007/978-3-662-58485-9.

Krä, Michaela; Vogt, Ludwig; Härdtlein, Christian; Schiele, Stefan; Schilp, Johannes (2020): Production planning for collaborating resources in cyber-physical production systems. In: *Procedia CIRP* 93, S. 192–197. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.030.

Kurbel, Karl (1991): *CA-Techniken und CIM*, zuletzt geprüft am 21.12.2017.

Leino, Simo-Pekka (2015): Reframing the value of virtual prototyping, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Leu, Ming C.; ElMaraghy, Hoda A.; Nee, Andrew Y.C.; Ong, Soh Khim; Lanzetta, Michele; Putz, Matthias et al. (2013): CAD model based virtual assembly simulation, planning and training. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2), S. 799–822. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.005.

Leye, Stefan (2012): *Digital Engineering in KMU - Planungsprozesse bedarfsgerecht technologiebasiert unterstützen*. DOI: 10.1007/3-540-31281-1.

Li, Bin; Dong, Qiong; Dong, Jian; Wang, Junfeng; Li, Wang; Li, Shiqi (2018): Instruction Manual for Product Assembly Process Based on Augmented Visualization. In: *Chinese Automation Congress (CAC) 2018*, zuletzt geprüft am 30.01.2019.

Ling, Shiquan; Li, Ming; Guo, Daqiang; Rong, Yiming; Huang, George Q. (2022): Assembly Workstation 4.0: Concept, Framework and Research Perspectives for Assembly Systems Implementation in the Industry 4.0 Era. In: *IFAC-PapersOnLine* 55 (2), S. 420–426. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.230.

Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (2012): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Lusic, Mario; Hornfeck, Rüdiger; Fischer, Christian; Franke, Jörg (2013): Illustrating A Way for the Creation of IT-Based Information Systems for Assembly Staff Simultaneous to the Product - Engineering Process. In: *International Conference on Industrial Engineering and Management Science 2013*.

Lušić, Mario (2017): Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess. (Echtbuch, kein PDF) (Fertigungstechnik - Erlangen).

Lušić, Mario; Braz Schmutzer, Konrad; Wittmann, Stephan; Fischer, Christian; Hornfeck, Rüdiger; Franke, Jörg (2014): Worker Information Systems Including Dynamic Visualisation. A Perspective for Minimising the Conflict of Objectives between a Resource-Efficient Use of Inspection Equipment and the Cognitive Load of the Worker. In: *AMR 1018*, S. 23–30. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.23.

Mader, Steffen; Urban, Bodo (2010): Creating Instructional Content for Augmented Reality based on Controlled Natural Language Concepts. In: *International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*.

Makris, Sotiris; Pintzos, George; Rentzos, Loukas; Chryssolouris, George (2013): Assembly support using AR technology based on automatic sequence generation. In: *CIRP Annals* 62 (1), S. 9–12. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.095.

Malik, Ali Ahmad; Bilberg, Arne (2019): Human centered Lean automation in assembly. In: *Procedia CIRP* 81, S. 659–664. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.172.

Mark, Benedikt G.; Rauch, Erwin; Matt, Dominik T. (2021): Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions. In: *Journal of Manufacturing Systems* 59, S. 228–250. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.02.017.

Masood, Tariq; Egger, Johannes (2019): Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 58, S. 181–195. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.02.003.

Mathew, Arun Tom; Rao, C. S. P. (2010): A Novel Method of Using API to Generate Liaison Relationships from an Assembly. In: *JSEA* 03 (02), S. 167–175. DOI: 10.4236/jsea.2010.32021.

Mattson, Sandra; Fast-Berglund, Åsa (2016): How to Support Intuition in Complex Assembly? In: *Procedia CIRP* 50, S. 624–628. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.014.

Mayer, Marcel Ph.; Odenthal, Barbara; Faber, Marco; Winkelholz, Carsten; Schlick, Christopher M. (2012): Cognitive Engineering of Automated Assembly Processes. In: *Hum. Factors Man.* 24 (3), S. 348–368. DOI: 10.1002/hfm.20390.

Medellin, Hugo; Corney, Jonathan; Ritchie, James; Lim, Theodore (2010): Automatic generation of robot and manual assembly plans using octrees. In: *Assembly Automation* 30 (2), S. 173–183. DOI: 10.1108/01445151011029817.

Meißner, Alyssa; Glass, Rupert; Gebauer, Christopher; Stürmer, Sandra; Metternich, Joachim (2017): Hindernisse der Industrie 4.0 – Umdenken notwendig? In: *ZWF* 112 (9), S. 607–611. DOI: 10.3139/104.111787.

Merkel, L.; Weth, J.; Sochor, R.; Berger, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. (2019a): A Modular Framework for Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly, zuletzt geprüft am 12.02.2019.

Merkel, Lukas; Berger, Christoph; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther (2019b): Determination of Cognitive Assistance Functions for Manual Assembly Systems volume 795. DOI: 10.1007/978-3-319-94619-1.

Mohr, Peter; Kerbl, Bernhard; Donoser, Michael; Schmalstieg, Dieter; Kalkofen, Denis (2015): Retargeting Technical Documentation to Augmented Reality. DOI: 10.1145/2702123.2702490.

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G. et al. (2016): Cyber-physical systems in manufacturing. In: *CIRP Annals* 65 (2), S. 621–641. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.

Monostori, László; Váncza, József (2020): Lessons Learned from the COVID-19 Pandemic and Their Possible Consequences on Manufacturing. In: *Smart Sustain. Manuf. Syst.* 4 (3), S. 20200063. DOI: 10.1520/SSMS20200063.

Mosemann, Heiko; Wahl, Friedrich M. (2001): Automatic decomposition of planned assembly sequences into skill primitives. In: *IEEE Trans. Robot. Automat.* 17 (5), S. 709–718. DOI: 10.1109/70.964670.

Moussa, Mostafa; ElMaraghy, Hoda (2018): Master Assembly Network Generation. In: *Procedia CIRP* 72, S. 756–761. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.089.

Moussa, Mostafa; ElMaraghy, Hoda (2019): Master assembly network for alternative assembly sequences. In: *Journal of Manufacturing Systems* 51, S. 17–28. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.02.001.

Müller, Rainer; Scholer, Matthias; Karkowski, Martin (2019): Generic automation task description for flexible assembly systems. In: *Procedia CIRP* 81, S. 730–735. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.185.

Müller, Rainer; Vette, Matthias; Hörauf, Leenhard; Speicher, Christoph (2015): Mechatronische Module als Befähiger für einen durchgängigen Informationsfluss bei der Planung und dem Betrieb von Cyber-Physischen Montagesystemen, zuletzt geprüft am 20.12.2017.

Müller, Rainer; Vette, Matthias; Hörauf, Leenhard; Speicher, Christoph (2016a): Consistent data Usage and Exchange Between Virtuality and Reality to Manage Complexities in Assembly Planning. In: *Procedia CIRP* 44, S. 73–78. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.126.

Müller, Rainer; Vette, Matthias; Hörauf, Leenhard; Speicher, Christoph; Jatti, Kruttika (2016b): Concept and implementation of an agent-based control architecture for a cyber-physical assembly system. In: *MATEC Web of Conferences* 42, S. 4003. DOI: 10.1051/mateconf/20164204003.

Müller, Rainer; Vette-Steinkamp, Matthias; Hoerauf, Leenhard; Speicher, Christoph; Bashir, Attique (2018a): Intelligent and Flexible Worker Assistance Systems. Assembly Assistance Platform for Planning Assisted Assembly and Rework as Well as Execution of a Worker-Centered Assistance, S. 77–85. DOI: 10.5220/0006613900770085.

Müller, Rainer; Vette-Steinkamp, Matthias; Hörauf, Leenhard; Speicher, Christoph; Bashir, Attique (2018b): Worker centered cognitive assistance for dynamically created repairing jobs in rework area, zuletzt geprüft am 20.06.2018.

Neb, Alexander; Brandt, David; Rauhöft, Greg; Awad, Ramez; Scholz, Johannes; Bauernhansl, Thomas (2021): A novel approach to generate augmented reality assembly assistance automatically from CAD models. In: *Procedia CIRP* 104, S. 68–73. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.012.

Neb, Alexander; Strieg, Florian (2018): Generation of AR-enhanced Assembly Instructions based on Assembly Features. In: *Procedia CIRP* 72, S. 1118–1123. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.210.

Nikolenko, Alexander; Sehr, Philip; Hinrichsen, Sven; Bendzioch, Sven (2020): Digital Assembly Assistance Systems – A Case Study 959, S. 24–33. DOI: 10.1007/978-3-030-20040-4\_3.

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) (2021a): Webverweis zu Forschungsprojekt MMAssist II, zuletzt aktualisiert am 13.12.2021, zuletzt geprüft am 13.12.2021.

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) (2021b): Webverweis zu Forschungsprojekt TAI-VW, zuletzt aktualisiert am 13.12.2021, zuletzt geprüft am 13.12.2021.

Ou, Li-Ming; Xun, Xu (2013): Relationship matrix based automatic assembly sequence generation from a CAD model. In: *Computer-Aided Design* 45 (7), S. 1053–1067. DOI: 10.1016/j.cad.2013.04.002.

Oubari, Assem (2020): Leistungsprognose sozio-technischer Arbeitssysteme, zuletzt geprüft am 09.05.2022.

Paelke, Volker; Röcker, Carsten (2015): User Interfaces for Cyber-Physical Systems. Challenges and Possible Approaches 9186. DOI: 10.1007/978-3-319-20886-2.

Palmqvist; A.; Vikingsson; E.; Li; D. et al (2020): Concepts for Digitalisation of Assembly Instructions for Short Takt Times, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

Pan, Chunxia (2005): Integrating CAD files and automatic assembly sequence planning: Retrospective Theses and Dissertations. 1764, zuletzt geprüft am 12.06.2018.

Pantano, Matteo; Regulin, Daniel; Lutz, Benjamin; Lee, Dongheui (2020): A human-cyber-physical system approach to lean automation using an industrie 4.0 reference architecture. In: *Procedia Manufacturing* 51, S. 1082–1090. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.152.

Pantförder, Dorothea; Mayer, Felix; Diedrich, Christian; Göhner, Peter; Weyrich, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (2014): Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen - Evolution statt Revolution. DOI: 10.1007/978-3-658-04682-8.

Peppers, Ken; Tuunanen, Tuure; Niehaves, Björn (2018): Design science research genres. Introduction to the special issue on exemplars and criteria for applicable

design science research. In: *European Journal of Information Systems* 27 (2), S. 129–139. DOI: 10.1080/0960085X.2018.1458066.

Peffer, Ken; Tuunanen, Tuure; Rothenberger, Marcus A.; Chatterjee, Samir (2007): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems* 24 (3), S. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.

Pfeiffer, Sabine (2018): Montage, Wissen und Erfahrung. Warum „einfache“ Arbeit auch Wissensarbeit ist, warum Erfahrung in flexibler Montage so wichtig ist – und was das alles bildungspolitisch bedeutet, zuletzt geprüft am 08.11.2018.

Pintzos, Geroge; Matsas, Markos; Triantafyllou, Christos; Papakostas, Nikolaos; Chryssolouris, George (2015): An Integrated Approach to the Planning of Manual Assembly Lines. In: *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, V015T19A016. DOI: 10.1115/IMECE2015-52962.

Quint, Fabian; Loch, Frieder; Orfgen, Marius; Zuehlke, Detlef (2016): A System Architecture for Assistance in Manual Tasks 21, zuletzt geprüft am 12.11.2018.

Ranz, Fabian; Hummel, Vera; Sihn, Wilfried (2017): Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 182–189. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.011.

Reisinger, Gerhard; Hold, Philipp; Sihn, Wilfried (2020): Automated Information Supply of Worker Guidance Systems in Smart Assembly Environment, zuletzt geprüft am 03.11.2019.

Reisinger, Gerhard; Komenda, Titanilla; Hold, Philipp; Sihn, Wilfried (2018): A Concept towards Automated Data-Driven Reconfiguration of Digital Assistance Systems. In: *Procedia Manufacturing*, vol. 23, zuletzt geprüft am 06.04.2018.

Ribeiro, Luis; Hochwallner, Martin (2018): Complexity: On the Design Complexity of Cyber-Physical Production Systems, zuletzt geprüft am 15.05.2018.

Riesener, Michael; Dölle, Christian; Keuper, Alexander; Fruntke, Marc; Schuh, Guenther (2021): Quantification of complexity in cyber-physical systems based on key figures. In: *Procedia CIRP* 100, S. 445–450. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.102.

Ríos, José; Bernard, Alain; Bouras, Abdelaziz; Foufou, Sebti (Hg.) (2017): *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future 2017*, zuletzt geprüft am 21.06.2018.

Robertson, Suzanne; Robertson, James (2013): *Mastering the Requirements Process. Getting Requirements Right*. In: *Addison-Wesley Professional*, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Rolland, Colette (1993): *Modeling the Requirements Engineering Process*. In: *3rd European-Japanese Seminar on Information Modelling and Knowledge Bases, Budapest Hungary, 06/1993*, zuletzt geprüft am 08.11.2017.

Romero, David; Bernus, Peter; Noran, Ovidiu; Stahre, Johan; Fast-Berglund, Å. (2016a): *The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems* 488, zuletzt geprüft am 15.03.2018.

Romero, David; Stahre, Johan; Wuest, Thorsten; Noran, Ovidio; Bernus, Peter; Fast-Berglund, Asa; Gorecky, Dominic (2016b): *Towards an Operator 4.0 Typology. A Human-Centric perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies*. In: *46th International Conference on Computers & Industrial Engineering 2016*, zuletzt geprüft am 08.11.2018.

Romero, David; Wuest, Thorsten; Stahre, Johan; Gorecky, Dominic (2017): *Social Factory Architecture: Social Networking Services and Production Scenarios Through the Social Internet of Things, Services and People for the Social Operator 4.0*. DOI: 10.1007/978-3-319-66923-6.

Rudolf, Henning (2007): *Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie*: Utzverlag, zuletzt geprüft am 16.04.2018.

Rulhoff, Stefan; Reza, Jalali Sousanabady; Deuse, Jochen; Emmer, Christian (2013): *Concept and Data Model for Assembly Work Content Determination*, S. 353–357. DOI: 10.1007/978-3-319-02054-9\_60.

Rusch, Tobias; Steuer, Julius; König, Maximilian; Sochor, Robin; Fink, Klaus; Stelzle, Benedikt et al. (2021): *Tool-based automatic generation of digital assembly instructions*. In: *Procedia CIRP* 99, S. 454–459. DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.065.

Sahu, Dilip Kumar; Chowadhary, Abhimannu (2022): *A method for transformation of EBOM to MBOM with Multi-CAD Environment in Automotive BIW Manufacturing*. In:

*International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2022, zuletzt geprüft am 09.05.2022.

Salonen, Tapio; Säski, Juha; Woodward, Charles; Korkalo, Otto; Marstio, Ilari; Rainio, Karl (2009): Data Pipeline from CAD to AR Based Assembly Instructions. In: *ASME-AFM 2009 World Conference on Innovative Virtual Reality*.

Schäffer, Eike; Penczek, Lars; Mayr, Andreas; Bakakeu, Jupiter; Franke, Jörg; Kuhlenkötter, Bernd (2019): Digitalisierung im Engineering. Ein Ansatz für ein Vorgehensmodell zur durchgehenden, arbeitsteiligen Modellierung am Beispiel von AutomationML. In: *I40M 2019* (1), S. 61–66. DOI: 10.30844/I40M\_19-1\_S61-66.

Schreiber, Werner; Zürl, Konrad; Zimmermann, Peter (2017): Web-basierte Anwendungen Virtueller Techniken. Das ARVIDA-Projekt Dienste-basierte Software-Architektur und Anwendungsszenarien für die Industrie, zuletzt geprüft am 30.10.2017.

Schuh, Günther; Engländer, Jacques; Kaminski, Lars; Hicking, Jan; Bülskämper, Martin (2021): Derivation Of Counter-Measures For Industry 4.0 Environments And Cyber-Physical Production Systems Based On Their Cyber-Security Vulnerabilities. DOI: 10.15488/11253.

Schuh, Günther; Prote, Jan-Philipp; Molitor, Marco; Walendzik, Pia; Gerschner, Katharina; Oswald, Marc (2018): Entwicklung eines App-basierten Autorensystems zur Planungsunterstützung. In: *ZWF* 113 (6), S. 386–388. DOI: 10.3139/104.111933.

Schwartz, Maxim; Gupta, Satyandra K.; Brough, John E.; Anand, Davinder K.; Kavetsky, Robert (2007): Using Virtual Demonstrations for Creating Multi-Media Training Instructions. In: *Computer-Aided Design and Applications* 4 (1-4), S. 99–108. DOI: 10.1080/16864360.2007.10738530.

See, Birgit von; Kersten, Wolfgang (2017): Digitale Transformation des Arbeitsumfelds. Identifikation und Analyse von Handlungsfeldern in Unternehmen am Beispiel der Logistik, zuletzt geprüft am 19.04.2018.

Siedelhofer, Christian; Henke, Thomas; Bellmann, Artur; Litterscheidt, Jochen; Deuse, Jochen (2017): Konzept zur Rekonfiguration flexibler Montagesysteme. In: *ZWF* 112 (3), S. 141–145. DOI: 10.3139/104.111686.

Siedelhofer, Christian; Schallow, Julian; Wolf, Patrick; Mayer, Sebastian; Deuse, Jochen (2018): Simulationsbasierte Rekonfigurationsplanung flexibler Montagesysteme. In: *ZWF* 113 (4), S. 216–219. DOI: 10.3139/104.111895.

Sing, Amita; Quint, Fabian; Bertram, Patrick; Ruskowski, Martin (2018): Towards Modular and Adaptive Assistance Systems for Manual Assembly: A Semantic Description and Interoperability Framework, zuletzt geprüft am 11.10.2018.

Smith, G. C.; Smith, Shana S.-F. (2002): An enhanced genetic algorithm for automated assembly planning, zuletzt geprüft am 24.07.2019.

Stief, Paul; Dantan Jean-Yves; Etienne, Alan; Siadat Ali (2018): A new methodology to analyze the functional and physical architecture of existing products for an assembly oriented product family identification. In: *Procedia CIRP* 70, S. 47–52. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.026.

Stock, Ingo; Weber, Michael; Steinmeier, Eckhard (2005): Metadata based Authoring for Technical Documentation. DOI: 10.1145/1085313.

Stork, Sonja; Schubö, Anna (2010): Human cognition in manual assembly. Theories and applications. In: *Advanced Engineering Informatics* 24 (3), S. 320–328. DOI: 10.1016/j.aei.2010.05.010.

Strang, Daniel (2016): Kommunikationsgesteuerte cyberphysische Montagemodelle: Dissertation, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-4594-9, zuletzt geprüft am 08.11.2018.

Strang, Daniel; Galaske, Nadia; Anderl, Reiner (2014): Beschreibungsmethode für die Repräsentation cyberphysischer Produktionssysteme. In: *Entwerfen Entwickeln Erleben - EEE2014*, zuletzt geprüft am 28.11.2017.

Teubner, S.; Merkel, L.; Reinhart, G.; Hagemann, F.; Intra, C. (2019): Improving Worker Information - Proposal of a Dynamic and Individual Concept. In: *International Conference on Competitive Manufacturing COMA 2019*, zuletzt geprüft am 12.02.2019.

Teubner, S.; Reinhart, G.; Haymerle, R.; Merschbecker, U. (2016): Individuelle und dynamische Werkerinformationssysteme. Einordnung, Definition und Beschreibungsmodell, zuletzt geprüft am 28.11.2017.

Traub, Tilman; Gregório, Mateus Garcia; Groche, Peter (2018): A framework illustrating decision-making in operator assistance systems and its application to a roll forming process. In: *Int J Adv Manuf Technol* 3 (4), S. 5. DOI: 10.1007/s00170-018-2229-x.

Vaishnavi, Vijay; Kuechler, Bill (2015): Design Science Research in Information Systems. In: *MIS Quarterly*, Vol. 28, No. 1 (Mar., 2004), pp. 75-105 (31 pages), zuletzt geprüft am 13.05.2018.

Wiesbeck, Mathey (2013): Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung (Dissertation), zuletzt geprüft am 20.03.2017.

Wolfartsberger, Josef; Haslwanger, Jean; Lindorfer, René (2019): Perspectives on Assistive Systems for Manual Assembly Tasks in Industry. In: *Technologies* 7 (1), S. 12. DOI: 10.3390/technologies7010012.

Wolfartsberger, Josef; Zenisek, Jan; Silmbroth, Mathias; Sievi, Christoph (2017): Towards an Augmented Reality and Sensor-Based Assistive System for Assembly Tasks. In: *PETRA '17 Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, S. 230–231, zuletzt geprüft am 13.11.2017.

Zäh, Michael F.; Ostgathe, Martin; Wiesbeck, Mathey (2010): Ganzheitliches Datenmodell für kognitive Produktionssysteme. In: *ZWF* 105 (4), S. 309–315. DOI: 10.3139/104.110306.

Zauner, Jürgen; Haller, Michael; Brandl, Alexander; Hartmann, Werner (2003): Authoring of a Mixed Reality Assembly Instructor for Hierarchical Structures. In: *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2003*, zuletzt geprüft am 27.09.2017.

Zobel, Benedikt; Berkemeier, Lisa; Werning, Sebastian; Vogel, Jannis; Ickerott, Ingmar; Thomas, Oliver (2018): Towards a Modular Reference Architecture for Smart Glasses-based Systems in the Logistics Domain, zuletzt geprüft am 01.06.2018.

Zogopoulos, Vasilios; Geurts, Eva; Gors, Dorothy; Kauffmann, Steven (2022): Authoring Tool for Automatic Generation of Augmented Reality Instruction Sequence for Manual Operations. In: *Procedia CIRP* 106, S. 84–89. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.159.

## 9 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: VERÄNDERUNG DER ANTEILE VON PRODUKTIONSZEIT (NUTZLEISTUNG) UND RÜSTZEIT (STÜTZLEISTUNG) .....	11
ABBILDUNG 2: NOMINALPROZESS DSRM (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (PEFFERS ET AL. 2007)).....	12
ABBILDUNG 3: AUFBAU DER ARBEIT UND INHALT DER EINZELNEN KAPITEL.....	13
ABBILDUNG 4: MODULE UND OPERATOREN EINES MONTAGESYSTEMS (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (FELDMANN K., SLAMA S., GERGS H.J., WIRTH U. 2004)) .....	17
ABBILDUNG 5: ZWIEBELSCHALENMODELL VON CPS (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (BROY 2010)).....	18
ABBILDUNG 6: DER MENSCH ALS AKTEUR IN EINEM CYBERPHYSISCHEN SYSTEM (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (HAASE ET AL. 2015)).....	20
ABBILDUNG 7: RAHMENWERK DES INFORMATIONSFLOSSES EINES KOGNITIVEN ASSISTENZSYSTEMS (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (MERKEL ET AL. 2019A))..	29
ABBILDUNG 8: INFORMATIONSPROZESSMODELL IN DER MANUELLEN MONTAGE (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (BORNEWASSER ET AL. 2018)) .....	30
ABBILDUNG 9: ZYKLISCHER PROZESS DES FALLBASIERTE SCHLIEßENS (GRAFIK DIREKT ÜBERNOMMEN AUS (AAMODT UND PLAZA 1994)) .....	43
ABBILDUNG 10: EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSBEREICHS .....	53
ABBILDUNG 11: EINGRENZUNG AUF VISUELLE WERKERFÜHRUNG, EINORDNUNG IN DER GRUPPE DER INDUSTRIELLEN ASSISTENZSYSTEME.....	55
ABBILDUNG 12: EINGRENZUNG DES BETRACHTETEN SYSTEMUMGEBUNG .....	56
ABBILDUNG 13: EINGRENZUNG DES ERFORDERLICHEN, PRODUKTBSCHREIBENDEN WISSENS .....	57
ABBILDUNG 14: AKTUELLER PROZESS (IST-ZUSTAND) ZUR INFORMATIONSPROZESSMODELL VISUELLER WERKERFÜHRUNGSSYSTEME (UML 1.0 AKTIVITÄTSDIAGRAMM).....	79
ABBILDUNG 15: ENTSTEHUNG UND AUFBAU DES VORGEHENSMODELLS SOWIE DARIN EINFLIEßENDE TEIL-ERGEBNISSE .....	94
ABBILDUNG 16: KONZEPT DES VORGEHENSMODELLS MIT SECHS SCHRITTEN .....	96
ABBILDUNG 17: ENTWICKELTES PROZESSMODELL ZUR AUTOMATISIERTEN INFORMATIONSPROZESSMODELL UND ZUORDNUNG ZU VORGEHENSMODELL (UML 1.0 AKTIVITÄTSDIAGRAMM).....	102

ABBILDUNG 18: INFORMATIONSMODELL ZUR REPRÄSENTATION VON INFORMATIONEN UND WISSEN IM VORGEHENSMODELL (UML 1.0 KLASSENDIAGRAMM) .....	110
ABBILDUNG 19: UML 2.0 KOMPONENTENDIAGRAMM DES IMPLEMENTIERTEN SOFTWARE-ARTEFAKTS .....	116
ABBILDUNG 20: AUTHORIZING-TOOL (FREIE CAD-SOFTWARE FREECAD UND AUTHORIZING OBERFLÄCHE) ZUR UNTERSTÜTZUNG DES MONTAGEPLANUNGSPROZESSES .....	119
ABBILDUNG 21: INFORMATIONSAUSGABE DER RESULTATE DES FALLBASIERTE SCHLIEßENS .....	121
ABBILDUNG 22: VIER DER 15 ZU PLANENDEN PRODUKTVARIANTEN DES IM FALLBEISPIEL VERWENDETEN PRODUKTS MODELL-LKW .....	124
ABBILDUNG 23: ZEITLICHE AUFWÄNDE BEI MANUELLER INFORMATIONSVERSORGUNG OHNE SOFTWARE-ARTEFAKT .....	127
ABBILDUNG 24: ZEITLICHE AUFWÄNDE, BEI AUTOMATISierter INFORMATIONSVERSORGUNG MIT SOFTWARE-ARTEFAKT .....	129
ABBILDUNG 25: VERGLEICH DER ZEITLICHEN GESAMTAUFWÄNDE ÜBER 30 PLANUNGSDURCHGÄNGE .....	130
ABBILDUNG 26: AUTOMATISIERTE GENERIERTE ANLEITUNG, ABGEBILDET IN DER VERWALTUNGS-OBERFLÄCHE (BACKEND) EINER INDUSTRIELLEN WERKERFÜHRUNGSSOFTWARE .....	131
ABBILDUNG 27: ERGEBNISSE DES SUS-FRAGEBOGENS IM ÜBERBLICK.....	133
ABBILDUNG 28: EINORDNUNG DER SUS-GESAMTBEWERTUNG HINSICHTLICH DER ADJEKTIVBEWERTUNGEN, AKZEPTANZWERTE UND SCHULNOTENSKALEN (GRAFIK DIREKT ÜBERNOMMEN AUS (BANGOR ET AL. 2009)).....	134
ABBILDUNG 29: ÜBERBLICK ÜBER DIE ERGEBNISSE DER DURCHGEFÜHRTE SWOT-ANALYSE .....	138

## 10 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: SCHLÜSSEL ZUR EINORDNUNG DER ARBEITEN NACH HARVEY-BALLS-METHODE .....	68
TABELLE 2: EINORDNUNG THEMENVERWANDTER ARBEITEN MITTELS HARVEY-BALLS- METHODE.....	69
TABELLE 3: ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER ANFORDERUNGEN.....	92
TABELLE 4: ZEITLICHE AUFWÄNDE, BEI MANUELLER INFORMATIONSVERSORGUNG OHNE SOFTWARE-ARTEFAKT .....	126
TABELLE 5: ZEITLICHE AUFWÄNDE, BEI NUTZUNG DES SOFTWARE-ARTEFAKTS MIT FBS .	128
TABELLE 6: LEGENDE DER ANTWORTEN DER DURCHGEFÜHRTEN SUS-BEFRAGUNG.....	132
TABELLE 7: ERGEBNISSE DER DURCHGEFÜHRTEN SUS-BEFRAGUNG .....	134

## 11 Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
2D	Zweidimensional
AA	Augmented Assembly (Erweiterte Montage)
Abb.	Abbildung
AI	Artificial Intelligence (siehe KI)
Anz.	Anzahl
AR	Augmented Reality (Erweiterte Realität)
ARVIDA	Angewandte Referenzarchitektur für virtuelle Dienste und Anwendungen
ASP	Assembly Sequence Planning
AUV	Augmented Virtuality (Erweiterte Virtualität)
AV	Arbeitsvorbereitung
BOM	Bill of Material (Produktstückliste)
bspw.	beispielsweise
CAAP	Computer-Aided Assembly Planning
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CBR	Case-Based Reasoning (fallbasiertes Schließen)
CIM	Computer Integrated Manufacturing (rechnergestützte Produktion)
CPMS	Cyberphysisches Montagesystem
CPPS	Cyberphysische Produktionssysteme
CPS	Cyberphysisches System
CPSS	Cyber-Physical Social Systems
DFA	Design for Assembly

DIKW	Data, Information, Knowledge, Wisdom
DIN	Deutsche Industrienorm
DSRM	Design Science Research Methodology
dt.	Deutsch
EBOM	Engineering Bill of Material
EFFRA	European Factories of the Future Research Association
engl.	Englisch
ERP	Enterprise Ressource Planning
FBS	Fallbasiertes Schließen
FF	Forschungsfrage
FFG	Forschungsförderungsgesellschaft
GA	Genetische Algorithmen
GBOM	Generic GBOM (generische Produktstückliste)
HCI	Human-Computer Interaction (Mensch-Computer-Interaktion)
H-CPS	Human Cyber-Physical Systems
H-CPPS	Human Cyber-Physical-Production Systems
HMD	Head Mounted Display („am Kopf befestigte Anzeige“)
IEC	Internationale elektrotechnische Kommission
IEM	Integrated Enterprise Modeling
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
JPEG	Joint Photographic Experts Group
KI	Künstliche Intelligenz

KPLD	Kinematic Pair Liaison Diagram
KTS	Kognitive Technische Systeme
LKW	Lastkraftwagen
MAN	Manuelle Durchführung
MBOM	Manufacturing Bill of Material
MES	Manufacturing Execution System
ML	Machine Learning (Maschinelles Lernen)
MR	Mixed Reality (Gemischte Realität)
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MS	Montagesysteme
MTM	Methods-Time Measurement
MTO	Mensch-Technik-Organisation
Nr.	Nummer
OWL	Web Ontology Language
PbD	Programming by Demonstration
PLM	Product Lifecycle Management (Produktlebenszyklusmanagement)
PNG	Portable Network Graphics
PPR	Produkt-Prozess-Ressource
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und
REST	Representational State Transfer
RPP	Reconfigurable Process Planning
SA	Simulated Annealing
SUS	System Usability Scale

SWOT	Strengths (Stärken), Weakness (Schwächen), Opportunities (Chancen), Threats (Risiken)
SysML	Systems Modeling Language
Tab.	Tabelle
TAI-VW	Teilautomatisierte Informationsversorgung visueller Werkerführungssysteme
TIFF	Tagged Image Format
u.a.	und andere
UML	Unified Modeling Language
uvm.	Und vieles mehr
UX	User Experience (Nutzererlebnis)
vgl.	Vergleichlich
VR	Virtual Reality (Virtuelle Realität)
VTS	Virtuelles Trainingssystem
V-WFS	Visuelles Werkerführungssystem
WFS	Werkerführungssystem
WIS	Werkerinformationssystem
XML	Extensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel

## 12 Anhang

### 12.1 Lebenslauf des Autors

Dipl.-Ing.  
Gerhard Reisinger



#### Persönliche Daten

Geburtsdatum: [REDACTED]  
Geburtsort: [REDACTED]  
Staatsangehörigkeit: Österreich  
Führerschein: B

#### Beruflicher Werdegang

04 / 2020 – Heute	Einzelunternehmer bei Appatini Software-Entwicklung und digitales Marketing für Gastronomen
01 / 2016 – Heute	Fraunhofer Austria Research GmbH Geschäftsbereich Advanced Industrial Management Montageplanung und Assistenzsysteme Mitarbeit in industrienahen Forschungsprojekten Entwicklung von mobilen Apps (z.B. Fraunhofer KVP-APP)
04 / 2016 – 01 / 2020	Technische Universität Wien Universitätsassistent Mitarbeit in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 Sichtbarmachen von Industrie 4.0 Lösungen
02 / 2015 – 12 / 2015	Fraunhofer Austria Research GmbH Geschäftsbereich Produktions- und Logistikmanagement Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter Entwicklung der Fraunhofer KVP-APP Augmented Reality, Smart Devices
04 / 2009 – 11 / 2017	Einzelunternehmer Software-Entwicklung: Software-Entwicklung auf Anfrage UNIX-Serverhosting und IOT-Lösungen, Webdesign

**Ausbildung**

2011 – 2015	Studium Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau Technische Universität Wien Bachelorarbeit: „Benchmark Hartdreh-Schruppen“ Diplomarbeit: „Entwicklung eines mobilen Werkerführungssystems im Umfeld variantenreicher Montageprozesse“ Master-Schwerpunkte: Qualitätsmanagement, Logistikmanagement
2005 – 2010	HTL St. Pölten Maschineningenieurwesen & Automatisierungstechnik
2001 – 2005	Bundesrealgymnasium Lilienfeld (Unterstufe)

## 12.2 Publikationsliste

### Konferenz-Beiträge:

- Hold, P.; Erol, S.; **Reisinger, G.**; Sihm, W.: „Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems“; Conference of Learning Factories 2017 (2017)
- **Reisinger, G.**; Komenda, T.; Hold, P.; Sihm, W.: „A Concept towards Automated Data-Driven Reconfiguration of Digital Assistance Systems“; Conference of Learning Factories 2018 (2018)
- Ranz, F.; Komenda, T.; **Reisinger, G.**; Hold, P.; Hummel, V.; Sihm, W.: „A Morphology of Human Robot Collaboration Systems for Industrial Assembly“, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems (2018)
- Komenda, T.; **Reisinger, G.**; Sihm, W.: „A Practical Approach of Teaching Digitalization Strategies in Cyber-Physical Production Systems“; 9th Conference on Learning Factories 2019 (2019)
- Hennig, M.; **Reisinger, G.**; Trautner, T.; Hold, P.; Gerhard, D.; Mazak, A.: „TU Wien Pilot Factory Industry 4.0“; 9th Conference on Learning Factories 2019 (2019)
- **Reisinger, G.**; Hold, P.; Sihm, W.: „Automated Information Supply of Worker Guidance Systems in Smart Assembly Environment“, 9th International Precision Assembly Seminar (2020)

### Sonstige Fachbeiträge:

- Hennig, M.; **Reisinger, G.**; Trautner, T.: „Digitalisierung in der Produktion – Informationsfluss der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“, Ö-WGP Zukunftspreis 2018 (2018)

**Betreute Diplom- und Masterarbeiten:**

- **Nausch, M.:** „Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur automatisierten, echtzeitfähigen Synchronisation von physischem Arbeitsprozess und digitalem Informationsfluss in einer cyber-physischen Montageumgebung“ (2018)
- **Graf, M.:** „Evaluierung eines Modells zur automatischen Content-Generierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage“ (2018)
- **Xuefeng, L.:** „Development of an Augmented-Reality Worker Guidance in Assembly by using Microsoft HoloLens“ (2019)
- **Kainz, T.:** „Optimierung der Montage in der FHW Franz Haas Waffelmaschinen GmbH: Ausarbeitung und Umsetzung von Verbesserungskonzepten“ (2019)
- **Schauer, B.:** „Entwicklung und Validierung einer Webanwendung zur Aufnahme von Arbeitsanweisungen für Werkerinformationssysteme“ (2020)
- **Schönauer, L.:** „Entwicklung eines Simulationsmodells zur Analyse und Optimierung des Fertigungskonzepts eines produzierenden Unternehmens in der Schienenfahrzeugindustrie“ (2020)
- **Zahir, F. Z.:** „A Model for a Real-time Ergonomics Assessment - Using a 3D Motion Tracking Sensor Suit: Model Development and Evaluation in Electronic Manufacturing“ (2021)
- **Besinger, P.:** „Optimierung und Validierung einer mobilen Applikation zur Unterstützung des Ideenmanagements“ (2021)
- **David, P.:** „Vorgehensmodell zur Anforderungserhebung für den erfolgreichen Einsatz einer Software zur Informationserstellung für die Montage“ (2022)
- **Biermeier, E.:** „Weiterentwicklung einer Ideenmanagement Software inklusive Neugestaltung und Validierung der Benutzeroberfläche“ (2022)