



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DISSERTATION

Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Prof. E.h. Dr. h.c. Wilfried Sihn
Technische Universität Wien
Institut für Managementwissenschaften,
Lehrstuhl für Betriebstechnik und Systemplanung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard
Ruhr-Universität Bochum
Institut Product and Service Engineering, Lehrstuhl für Digital Engineering

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Joachim Metternich
Technische Universität Darmstadt
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Philipp Hold, Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Matrikelnummer: 1428983
Johann-Nepomuk-Berger-Platz 4/20, 1160 Wien, Österreich

Wien, am 22. Mai 2020

(Philipp Hold)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

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.

Wien, am 22. Mai 2020

(Philipp Hold)

Kurzfassung

Durch den Trend stetig wechselnder und kurzzyklischer Arbeitsinhalte in Montagesystemen steigt das Risiko kognitiver Belastungssituationen für den Menschen, welches durch den Einsatz von Assistenzsystemen reduziert wird. Die Integration von digitalen Assistenzsystemen führt zu einem steigenden Digitalisierungs- und Vernetzungsgrad, wodurch digitalen Assistenzsystemen eine zentrale Rolle in zukünftigen Montagesystemen, sogenannten cyber-physischen Montagesystemen, zukommt. Der positive Einfluss digitaler Assistenzsysteme auf die Reduktion kognitiver Belastungen ist in der wissenschaftlichen Literatur vielfach beschrieben worden. Der quantitative Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Werkern sowie auf das Arbeitssystem der Montage wird hingegen nur ansatzweise verfolgt. Auf ein ganzheitliches Modell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme kann gegenwärtig in der Arbeitsvorbereitung nicht zugegriffen werden. Auf Grund der hohen Komplexität der Komponenten digitaler Assistenzsysteme hin zu einem ganzheitlich digitalen Assistenzsystem-Design stellt diese Arbeit die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage dar, welche einer Verbindung von werkerspezifischen, technischen und organisatorischen Anforderungen und Ausprägungen entlang des MTO-Konzeptes in Form von mathematisch beschreibbaren Parametern folgt. Vor diesem Hintergrund werden in dieser Arbeit zunächst aus drei verschiedenen Bereichen (Mensch – Technology – Organisation, MTO-Konzept) zentrale Beschreibungsparameter identifiziert und dahingehend analysiert, auf welche Art und Weise diese Beschreibungsparameter auf der Grundlage von Informationen, welche in frühen Phasen der Montageplanung (mit Schwerpunkt auf die Arbeitsmethodenbeschreibung Methode Time Measurement – MTM) gewonnen werden, ein menschenorientiertes und gleichzeitig produktives digitales Assistenzsystem-Design bestimmbar ist mit dem Ziel, eine quantifizierte Investitionsentscheidungsgrundlage zu finden. Hierzu wird ein mathematisches Framework entwickelt und aufgezeigt, mit dessen Hilfe monetär bewertete Aussagen zur Definition und Festlegung einer Investitionsentscheidung für ein digitales Assistenzsystem getroffen werden. Das Modell wurde unter Laborbedingungen in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 (FFG: Nr. 852105 und Nr. 852103) in Form eines softwarebasierten Proof-of-Concept Demonstrators getestet und im Rahmen des österreichischen Leitprojektes MMAssist II (FFG: Nr. 858623) in mehreren Use Cases in der Praxis validiert.

Keywords: Cyber Physical Assembly Systems, Digital Assistance Systems, Information Systems, Human-Machine Interaction

Abstract

The trend towards constantly changing and short-cycle work tasks in assembly systems increases the risk of cognitive work load of assembly operators, which can be reduced by digital assistance systems. The integration of digital assistance systems follows an increasing degree of digitalization and connectivity, whereby digital assistance systems have a central role in the context of cyber-physical assembly systems. The positive influence of digital assistance systems on the reduction of cognitive work load of assembly operators is described in the scientific literature. However, the quantitative influence on productivity of the assembly operators and of the assembly work systems is mentioned in the scientific literature just fundamentally. A holistic and applicable model for planning and evaluating of digital assistance systems is currently not described in the scientific literature. Due to the high complexity of components and different designs of digital assistance systems, this work represents the development of a procedure model for planning and evaluation digital assistance systems with regard to "mixed model assembly systems". Thereby, the model follows a combination of individual operator, technical and organizational requirements – formulated by mathematically describable parameters. In this way, this thesis focused three different domains: Human, Technology and Organization. According to these domains central description parameters are identified according to the state of the art. Hereafter, these description parameters are analyzed in order to figure out how and in which way a quantitative determination is possible based on information, which can be generated in early stages of assembly planning phases. The thesis emphasis work task description information based by motion time systems, method time measurement (MTM), determining a human-oriented and at the same time a productive digital assistance system design, with the objective to identify a quantitative investment decision. Based on the gained knowledge and results, a set of mathematical rules is developed and described in form of a holistic model. The developed model clarifies, how a quantified and monetary evaluated investment decision for the use and the implementation of a digital assistance can be made. The model was tested under laboratory conditions at the TU Wien Pilot Factory Industry 4.0 (FFG project no. 852105 and FFG project no. 852103) in the form of a software-based proof-of-concept demonstrator and evaluated in practice in several industrial use cases as part of the Austrian lead project MMAssist II (FFG project no. 858623).

Keywords: Cyber Physical Assembly Systems, Digital Assistance Systems, Information Systems, Human-Machine Interaction

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter und Projektleiter bei der Fraunhofer Austria Research GmbH (FhA), Geschäftsbereich Produktions- und Logistikmanagement, sowie als Doktoratsstudent im Rahmen des Doktoratskollegs cyber-physisches Produktionssysteme (DC-CPPS) am Institut für Managementwissenschaften der Technischen Universität Wien (IMW) und im Rahmen meiner Projekt-tätigkeiten in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 entstanden.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Wilfried Sihn, Geschäftsführer FhA und Leiter des Bereichs Betriebstechnik und Systemplanung am IMW, danke ich für die wohlwollende Förderung meiner Ideen und die unermüdliche Betreuung dieser Arbeit. Ohne seinen motivierenden Zuspruch wäre ein Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Bedanken möchte ich mich aber auch bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Sebastian Schlund, BMVIT-Stiftungsprofessor „Human Centered Cyber Physical Assembly Systems“ am IMW, durch dessen Stiftungsprofessur ich weiß, dass es gelungen ist, die wissenschaftliche Forschung im Spannungsfeld zwischen „Industrial Engineering & Management“ und mordensten Formen von Informations- und Kommunikationstechnologien an der TU Wien nachhaltig zu etablieren.

Zu großem Dank bin ich allen Kolleginnen und Kollegen des Doktoratskollegs CPPS sowie allen involvierten Kolleginnen und Kollegen der Forschungsprojekte „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ (FFG: Nr. 852105 und Nr. 852103) und „MMAssist - Assistenzsysteme in der Produktion im Kontext Mensch – Maschine Kooperation“ (FFG: Nr. 858623) verpflichtet. Ebenso großer Dank gebührt all jenen Kolleginnen und Kollegen vom FhA und IMW, mit denen ich sieben Jahre lang spannende Projekte bearbeiten und vielfältige Forschungsfragen und -antworten zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme diskutieren durfte.

Speziellen Dank möchte ich an meine Eltern und an meine Großmütter richten: Ohne Eure Unterstützung und ohne die Diskussionen mit Euch über die Sinnhaftigkeit einer Dissertation hätte diese Arbeit viel mehr meiner Lebenszeit verbraucht. Widmen möchte ich diese Arbeit meinen Eltern aber auch meinem Großvater Dieter, der mir nicht nur Österreich stets skifahrambitioniert nähergebracht hat, sondern mich auch darin bestärkt hat, den eigenen Zielvorstellungen und Wünschen zu folgen.

Wien, im Mai 2020

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	AUSGANGSSITUATION UND MOTIVATION	1
1.2	GRUNDLEGENDE PROBLEMSTELLUNG	4
1.3	AUFBAU DER ARBEIT	8
2	DEFINITIONEN, BEZUGSRAHMEN UND ABGRENZUNG DER ARBEIT	11
2.1	MONTAGESYSTEME DER ZUKUNFT	11
2.2	DIGITALE ASSISTENZSYSTEME IN DER MONTAGE DER ZUKUNFT.....	15
2.3	BEZUGSRAHMEN UND ABGRENZUNG DER ARBEIT	17
3	STAND DER FORSCHUNG	20
3.1	ZIELE UND FUNKTIONEN DIGITALER ASSISTENZSYSTEME.....	20
3.2	GESTALTUNGSFELDER DIGITALER ASSISTENZSYSTEME.....	24
3.3	PLANUNG UND EVALUIERUNG DIGITALER ASSISTENZSYSTEME.....	27
3.4	FORSCHUNGSBEDARF.....	34
4	PROBLEMSTELLUNG, ZIELSETZUNG UND ANFORDERUNG	38
4.1	PROBLEMSTELLUNG	38
4.2	ZIELSETZUNG UND FORSCHUNGSFRAGE.....	39
4.3	ANFORDERUNGEN AN DAS VORGEHENSMODELL.....	40
5	TECHNISCHE FAKTOREN DIGITALER ASSISTENZSYSTEME.....	46
5.1	BESCHREIBUNGSPARAMETER DIGITALER ASSISTENZSYSTEME	47
5.1.1	<i>Morphologie und Technologie-Pools digitaler Assistenzsysteme</i>	<i>48</i>
5.1.2	<i>Beschreibungskriterien digitaler Assistenzsysteme</i>	<i>55</i>
5.2	FORMULIERUNG DER BESCHREIBUNGSPARAMETER DIGITALER ASSISTENZSYSTEME	57
5.2.1	<i>Mobilitätsgrad</i>	<i>58</i>
5.2.2	<i>Kognitive Werkerbelastung.....</i>	<i>59</i>
5.2.3	<i>Flexibilitätsgrad.....</i>	<i>65</i>
5.2.4	<i>Informationsquellen</i>	<i>65</i>
5.2.5	<i>Zeitpunkt der Informationsbereitstellung.....</i>	<i>66</i>
5.2.6	<i>Zugang zu der Werkerinformation</i>	<i>67</i>
5.2.7	<i>Reale versus virtuelle Werkerinformation</i>	<i>68</i>
5.2.8	<i>Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation</i>	<i>69</i>
5.2.9	<i>Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen ..</i>	<i>71</i>
5.2.10	<i>Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit des Systems</i>	<i>71</i>

5.3	EINFLÜSSE DER BESCHREIBUNGSPARAMETER AUF KOMPONENTEN DAS	73
5.4	ZUSAMMENFASSUNG	75
6	MENSCHLICHE FAKTOREN DIGITALER ASSISTENZSYSTEME	77
6.1	BESCHREIBUNGSPARAMETER DES MENSCHEN	78
6.2	FORMULIERUNG DER BESCHREIBUNGSPARAMETER MENSCH.....	83
6.3	EINFLÜSSE DER BESCHREIBUNGSPARAMETER AUF DIGITALE ASSISTENZSYSTEME...	84
6.4	ZUSAMMENFASSUNG	88
7	PRODUKTIVE FAKTOREN DIGITALER ASSISTENZSYSTEME.....	90
7.1	AUSFÜHRUNGSZEIT	91
7.1.1	<i>Beschreibungsparameter Ausführungszeit.....</i>	<i>92</i>
7.1.2	<i>Formulierung der Beschreibungsparameter Ausführungszeit.....</i>	<i>93</i>
7.1.3	<i>Einflüsse digitaler Assistenzsysteme auf Ausführungszeiten</i>	<i>98</i>
7.1.4	<i>Fazit.....</i>	<i>100</i>
7.2	EINLERN- UND TRAININGSZEIT	101
7.2.1	<i>Beschreibungsparameter Einlern- und Trainingszeit</i>	<i>101</i>
7.2.2	<i>Formulierung der Beschreibungsparameter Einlern- und Trainingszeit.</i>	<i>104</i>
7.2.3	<i>Einflüsse digitaler Assistenzsysteme auf Einlern- und Trainingszeiten..</i>	<i>106</i>
7.2.4	<i>Fazit.....</i>	<i>110</i>
7.3	MENSCHLICHE FEHLER	111
7.3.1	<i>Beschreibungsparameter menschliche Fehler.....</i>	<i>111</i>
7.3.2	<i>Formulierung der Beschreibungsparameter menschlicher Fehler</i>	<i>114</i>
7.3.3	<i>Einflüsse digitaler Assistenzsysteme auf menschliche Fehler</i>	<i>123</i>
7.3.4	<i>Fazit.....</i>	<i>126</i>
7.4	ZUSAMMENFASSUNG	127
8	KONZEPTION UND FORMULIERUNG DES VORGEHENSMODELLS	130
8.1	KONZEPTION DES VORGEHENSMODELLS	131
8.2	FORMULIERUNG DES VORGEHENSMODELLS.....	136
8.2.1	<i>Definition der Beschreibungsparameter (Bestimmungsgrößen)</i>	<i>137</i>
8.2.2	<i>Formulierung des Optimierungsproblems.....</i>	<i>146</i>
8.2.3	<i>Formulierung des Lösungsverfahren</i>	<i>149</i>
8.3	KRITISCHE REFLEXION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	157

9	VALIDIERUNG DURCH ANWENDUNG IN USE CASES.....	160
9.1	ANWENDUNG IN EINEM PRAXISORIENTIERTEN LABOR USE CASE.....	160
9.1.1	<i>Beschreibung des Labor Use Cases</i>	<i>161</i>
9.1.2	<i>Anwendung des Vorgehensmodells</i>	<i>162</i>
9.1.3	<i>Fazit.....</i>	<i>167</i>
9.2	ANWENDUNG IN EINEM INDUSTRIE USE CASE.....	169
9.2.1	<i>Beschreibung des Industrie Use Case.....</i>	<i>169</i>
9.2.2	<i>Anwendung des Vorgehensmodells</i>	<i>171</i>
9.2.3	<i>Fazit.....</i>	<i>175</i>
9.3	EINFLUSS VON WERKER-PROFILIEN AUF DIE ERGEBNISSE	176
9.4	KRITISCHE REFLEXION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	178
10	ZUSAMMENFASSUNG, DISKUSSION UND AUSBLICK	183
10.1	ZUSAMMENFASSUNG	183
10.2	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	186
10.3	AUSBLICK	190
11	LITERATURVERZEICHNIS	193
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	209
13	TABELLENVERZEICHNIS.....	214
14	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	220
15	ANHANG.....	225
16	LEBENS LAUF.....	295

1 Einleitung

Kapitel 1 verdeutlicht die Ausgangssituation und Motivation (Kapitel 1.1) sowie die grundlegende Problemstellung (Kapitel 1.2) dieser Arbeit. Darüber hinaus werden Aufbau dieser Arbeit und verwendete Methoden aufgezeigt (Kapitel 1.3). Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird ausschließlich die männliche Form benutzt. Es sind dabei aber sowohl männliche als auch weibliche Personen gemeint.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Industrieunternehmen mit ausgeprägten manuellen oder teilmanuellen (hybriden) Montageprozessen stehen vor der Herausforderung, einer zunehmenden Prozesskomplexität effizient und effektiv zu begegnen, die von einer stetig steigenden Individualisierung von Produktfamilien und -varianten determiniert wird. Eine alternde und diversifizierte Belegschaft in Industrieunternehmen stellt dabei zusätzliche Herausforderungen an die wirtschaftliche Gestaltung von Prozessen. Vor allem Montagesysteme stoßen bei der Bewältigung dieser Herausforderungen an ihre wirtschaftlichen und technischen Grenzen. Durch diesen Trend halten neue Montagekonzepte und -formen Einzug in Industrieunternehmen, welche dem Produktionsparadigma cyber-physischer Systeme (CPS) folgen [1]. CPS realisieren eine Verbindung zwischen der physischen – real existierenden – und der digitalen Welt. Diese Systeme setzen sich aus mikroelektronischen, eingebetteten Teil-Systemen zusammen, die physikalische Objekte durch den Einsatz von Sensoren erfassen und über Aktoren mit physikalischen Prozessen interagieren. Die Systeme sind über informations- und kommunikationsbasierte Netzwerke verbunden und tauschen Daten und Dienste weltweit aus. Dabei stellen sie keine (technisch) geschlossenen Einheiten dar, sie sind vielmehr als offene, sogenannte soziotechnische Systeme definiert, welche durch einen hohen Vernetzungsgrad der physischen, sozialen und virtuellen Welt unter Verwendung intelligenter Informations- und Kommunikationssystemen charakterisiert werden können [2], [3]. Durch die Integration von CPS in Montagesysteme werden neue Konzepte und Formen von Montagesystemen und -prozessen möglich [4], welche unter dem Begriff cyber-physische Montagesysteme (CPMS) in der wissenschaftlichen Literatur zu finden sind und deren Wirk- und Funktionsprinzipien in Industrieunternehmen zunehmend Anwendung finden.

Erste, pilothafte Umsetzungen CPMS proklamieren, dass diese Herausforderungen einer volatilen Kundennachfrage und den daraus resultierenden Anforderungen an

Flexibilität und Wandlungsfähigkeit begegnen und es ermöglichen, Losgröße eins unter Konditionen der Serien- und Massenproduktion zu realisieren [4], [5]. Dem Konzept cyber-physischen Montagesystemen folgend, determiniert Losgröße eine häufige und dynamische Änderungen der Arbeitsinhalte. Auszuführende Arbeitstätigkeiten der Montage folgen diesen Änderungen. Ähnlichkeiten von Montagetätigkeiten nehmen in dem Konzept cyber-physischer Montagesysteme ab. Möglichkeiten, Montagetätigkeiten routiniert auszuführen, nehmen dabei ebenso ab. Steigende körperliche (physische) und geistige (kognitive) Beanspruchungen der Werker sind als Folge zu erwarten [6]. Die Wahrscheinlichkeit der Ausführung fehlerhafter Tätigkeiten stellt eine unvermeidliche Konsequenz dar. Das Risiko von unkontrollierbaren Arbeitssituationen und instabilen Montageprozesse wird zunehmen [7].

In modernen Montagesystemen stellen digitale Assistenzsysteme (DAS) eine Schnittstelle dar, mit welcher der Werker bei der Ausführung manueller Tätigkeiten unterstützt wird. Hierdurch entsteht eine Mensch-System-Interaktion [8], sowohl zwischen Mensch und Montagesystem als auch zwischen Mensch und dem Informationssystem DAS. Es ist das Ziel des DAS, Lücken zwischen erforderlichen Kompetenzen zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe (Leistungsanforderungen) und den Fähigkeiten von Workern (Leistungsangebot) zu schließen, wodurch die Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Workern und Arbeitssystem, beispielsweise durch Reduzierung von Einlern- und Trainingszeiten, Ausführungs- und Bedienungsfehlern und durch Gewährleistung stabiler Montageprozessen, erhalten und nach Möglichkeit erhöht werden kann [9], [10].

Dabei gehen DAS-Funktionen weit über eine reine Informationsdarstellung in Bezug auf Arbeitsanweisungen hinaus. Durch eine stetig fortschreitende Vernetzung mit der Montagesystemperipherie sind Möglichkeiten gegeben, eine echtzeitfähige, taktsynchrone und damit situative Unterstützung der Werker zu realisieren. Dies bedeutet, dass Montageanweisungen und -informationen zur Tätigkeitsausführung automatisch mit dem Arbeitsfortschritt des Werkers synchronisiert werden können, ohne dass eine manuelle Rückmeldung an das System erfolgen muss. Die Verwendung der richtigen Materialien und Teile sowie der Einsatz der richtigen Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge wird sensor- und kameragestützt in Echtzeit überwacht. Über logische Regelwerke werden Sensorsignale mit entsprechenden Prozessdaten verbunden und analysiert [4]. Montagebezogene Fehler werden über Softwaresysteme identifiziert, dem Werker werden Arbeitsanweisungen zur Korrektur zur richtigen Zeit, am richtigen Ort und in der richtigen Qualität zur Verfügung gestellt [11]. Darüber hinaus überwachen moderne DAS qualitätskritische Prozesse, das heißt, sie steuern und konfigurieren

beispielsweise Schraub- (Drehmoment und Drehwinkel) und Messwerkzeuge, wodurch ein aufgabenspezifischer Einsatz abgesichert und gleichzeitig dokumentiert wird, zum Beispiel im Zuge eines Qualitäts- und Verbesserungsmanagements [12]. Abbildung 1 verdeutlicht beispielhaft den Aufbau eines DAS mit verschiedenen Komponenten [13] als Beispiel für die Vielzahl Komponenten DAS.

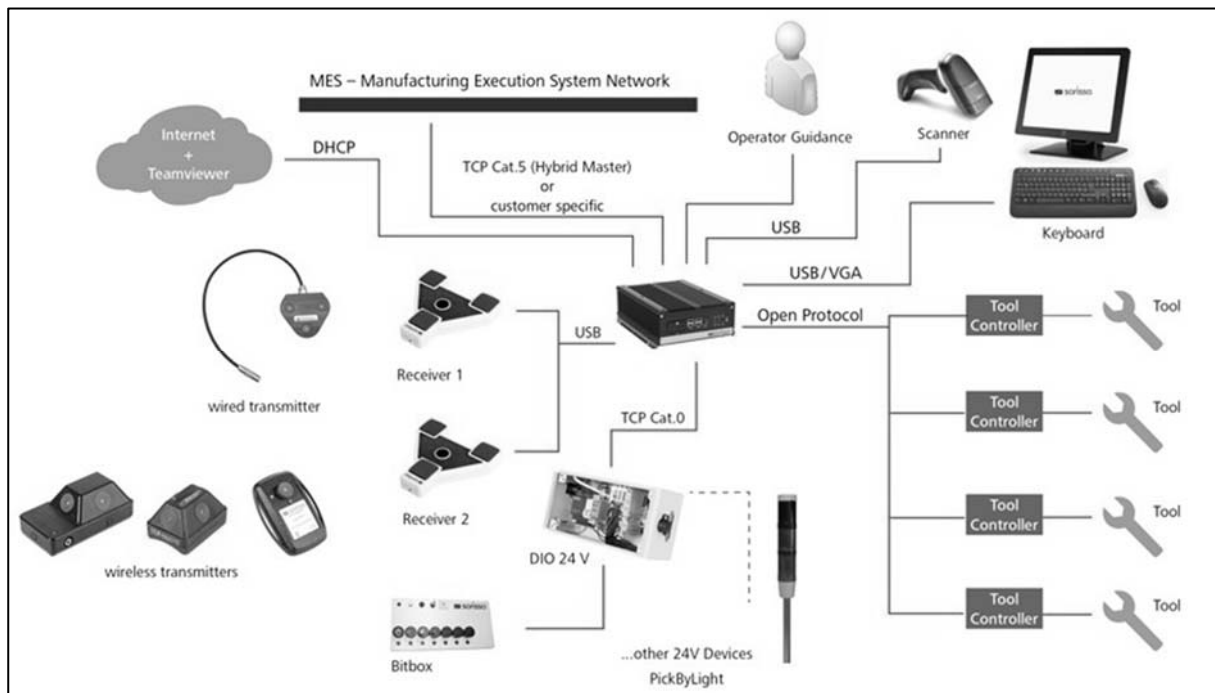


Abbildung 1: Beispiel eines modernen DAS [12]

Während Assistenzsysteme in der Montage kein Novum sind, verdeutlicht der in den letzten Jahren gestiegene Stellenwert der Digitalisierung, dass unter anderem im Kontext DAS eine Vielzahl neuer Komponenten auf dem Käufermarkt Einzug gehalten hat. Dabei finden sich einige Komponenten heute in industriellen DAS wieder, die ursprünglich für den Privatgebrauch entwickelt worden sind, und von verschiedenen Anbietern vertrieben werden. Über die „Technology Push“ und „Demand Pull“-Strategien [14] vieler Hersteller kommen kontinuierlich neue Komponenten DAS auf den Markt. Studienergebnisse von WILLEKE und KASSELMANN (2016) verdeutlichen dabei ein zentrales Paradoxon, mit dem Industrieunternehmen in Bezug auf damit verbundene Möglichkeiten und Chancen DAS konfrontiert sind. Zum einen erwarten Industrieunternehmen einen signifikanten Mehrwert beziehungsweise einen signifikanten Nutzen durch die Einführung und Verwendung von DAS in nahezu allen Unternehmensbereichen, dennoch sagen mehr als 60 Prozent der befragten Industrieunternehmen, dass ihnen der genaue Einsatz und der genaue Nutzen von DAS unklar ist und ihnen eine Marktübersicht über vorhandene Systeme fehlt [13].

1.2 Grundlegende Problemstellung

Um wirtschaftlichen Herausforderungen bei der Planung und Steuerung von Arbeitssystemen¹ in Produktion und Montage zu begegnen, folgte die Industrie in den letzten Jahrzehnten unterschiedlichen Gestaltungsparadigmen wie dem „Taylorismus“, der „Humanisierung der Arbeit“, dem „Computer Integrated Manufacturing – CIM“ und der Philosophie des „Lean Management“ [16]–[18]. Die in Abbildung 2 aufgezeigten Trends von Produktionsdesignparadigmen verdeutlichen die Notwendigkeit, im Zuge einer erfolgreichen Planung und Gestaltung von Arbeitssystemen die Aufmerksamkeit auf eine ganzheitliche Sichtweise der Faktoren Mensch, Technik und Organisation zu lenken. Die Beachtung dieser Faktoren wird die Wettbewerbsfähigkeit von Industrieunternehmen nachhaltig verbessern [17], [19].

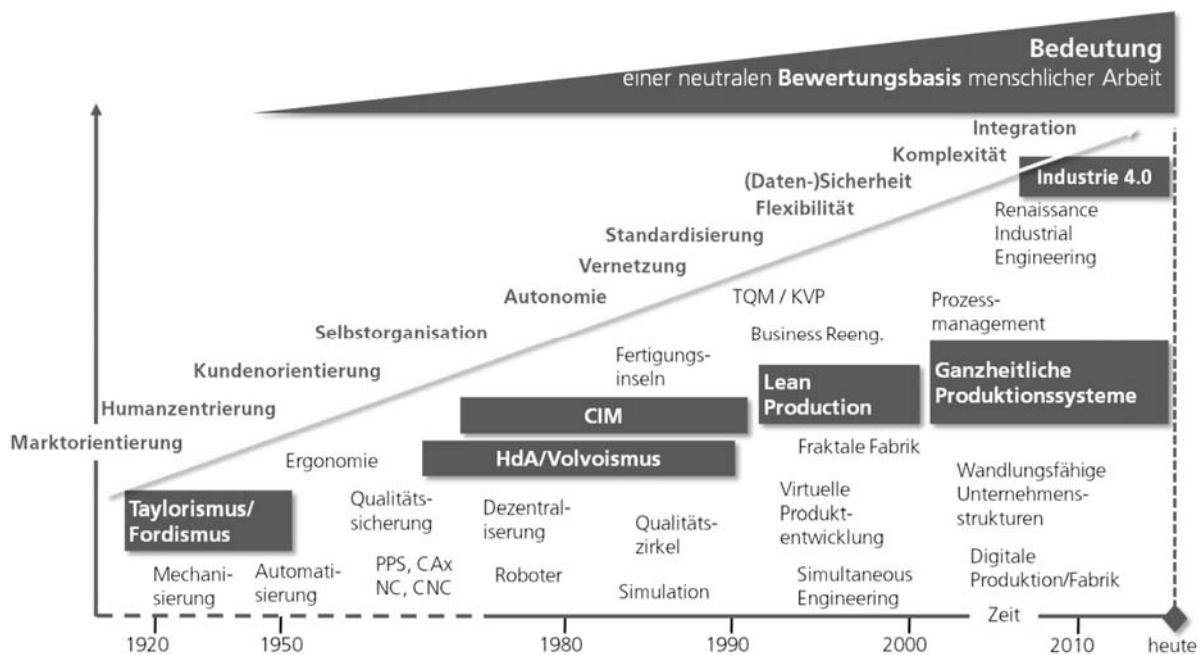


Abbildung 2: Produktionsgestaltungspfadparadigmen des letzten 100 Jahre [17]

Während verwendete Methoden und Werkzeuge im Rahmen des Lean Management besonders geeignet sind, die Wirtschaftlichkeit von Arbeitssystemen zu bewerten [20], werden Anforderungen an Informations- und Kommunikationstechnologien bezugnehm-

¹ Nach DIN EN ISO 6385:2004 ist ein Arbeitssystem definiert als ein System, „[...] welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen“ [15, S. 2004]

mend auf eine Erschließung von Wirtschaftlichkeits-, Produktivitätspotenzial und Aussagen zu Investitionsentscheidungen im Zusammenhang mit dem sogenannten Mensch-Technik-Organisations-Konzept (MTO-Konzept) [21] nicht berücksichtigt [22]. Doch gerade die Anpassung und Ergänzung von klassischen Methoden und Werkzeugen des Lean Management stellen eine Möglichkeit dar, die Nachfrage eines volatilen Marktes im Hinblick auf eine wirtschaftliche und flexible Produktion von kleinen Stückzahlen zu realisieren und gleichzeitig ergonomische und alters- und altersgerechte Arbeitsbedingungen zu realisieren [17]. Im Sinne einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und Anpassung von Methoden und Werkzeugen des Lean Management gilt es, spezifische Anforderungen aus menschenorientierter sowie aus betriebswirtschaftlicher Sicht im Zuge von Arbeitsrationalisierung und -intensivierung [23] auch im Hinblick auf Nutzung und Integration von DAS in der Montage zu berücksichtigen. Um Investitionsentscheidungen in DAS bereits in frühen Planungsphasen eines Montagesystems treffen zu können, ist es notwendig, spezifische Bedürfnisse von Werkern im Hinblick auf organisatorische Anforderungen unter Beachtung technischer Möglichkeiten DAS zu identifizieren, mit dem Ziel wirtschaftlichkeits- und produktivitätsfördernde Arbeitssysteme und gleichzeitig fördernde Werkerbedingungen zu gewährleisten.

Mit einer Bibliometrieanalyse sind 11.411 relevante wissenschaftliche Publikationen aus vorselektierten und repräsentativen Publikationen der Jahre 2012 bis 2018 analysiert worden. Im Anhang wird in Abbildung 50 die Visualisierung der Ergebnisse dargestellt. Die Grundlage der Bibliometrieanalyse stellen die Stichworte Assistenzsysteme in der Montage, Mitarbeiterinformationssysteme in der Montage, visuelle Assistenzsysteme, kognitive Assistenzsysteme, digitale Assistenzsysteme, Augmented Reality, Wearable-Technologien, cyber-physische Systeme, cyber-physische Montagesysteme, Assembly Tracking-Systeme und Decision Support Systeme dar. Die Analyse zeigt, dass Vorgehensmodelle zur quantifizierten Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Produktionsforschung unter Berücksichtigung einzelner Komponenten DAS keine Berücksichtigung finden. Dabei sind erste Ansätze zur Identifizierung und Bewertung eines qualitativen Assistenzbedarfs vor allem in Veröffentlichungen im Kontext der kognitiven Fabrikplanung zu finden [10], [21], [24]–[26].

CLAEYS ET AL. (2015) beschreiben ein qualitatives Regelwerk, in dem die Zusammenhänge zwischen menschlichen extrinsischen und intrinsischen Faktoren und den Bedürfnissen einer kognitiven Automatisierung in der Mixed-Model Montage von Workern aufgezeigt werden. Das Regelwerk geht dabei nicht auf quantitativ messbare Produktivitäts- und Wirtschaftlichkeitseffekte ein und stellt keine technischen Systeme zur

Umsetzung einer entsprechenden kognitiven Automatisierung dar [24]. Dem gegenüber stellen HINRICHSSEN ET AL. (2016) eine beschreibende Morphologie von Assistenzsystemen in der Montage auf und verdeutlichen die Bedeutung des Modells von GEISER (1997), in welchem der Einfluss von Arbeitsaufgabe, Benutzer, Umgebungseinflüssen und Interaktion zur Findung einer technischen Gesamtlösung [27], [28] durch die aufgestellte Morphologie von tragender Bedeutung sind [29]. Auf welche Art eine Gesamtlösung zu finden ist, wird nicht dargestellt. Grundlegende Schritte zur Findung einer solchen Gesamtlösung werden hingegen von HOLLNAGL (1987) beschrieben. Nach HOLLNAGL (1987) sind dabei zunächst Rückschlüsse auf Anforderung zu ziehen, welche Informationen über eine Arbeitsaufgabe einem Werker gegeben werden (*Fokus: WHAT*). Des Weiteren sind Anforderung zu klären, auf welche Weise die Information dem Werker (*Fokus: HOW*) und schließlich, wann die Information dem Werker (*Fokus: WHEN*) zur Verfügung zu stellen ist [30]. HOLLNAGL stellt jedoch diesen grundlegenden Anforderungen keine technischen Möglichkeiten gegenüber. Die Morphologie von Werkerinformationssystemen nach REINHRARD (2017) greift die grundlegenden Anforderungen von HOLLNAGL (1987) in Ergänzung zu Informationssystemanforderungen nach KRECMAR (2015) in Form von Gestaltungsfeldern [31] auf und ordnet diesen Gestaltungsparameter zu. Den Gestaltungsparametern wiederum sind Ausprägungen entsprechender Informationssysteme zugeordnet [21]. Konkrete Komponenten [13] werden hingegen innerhalb der Morphologie nicht dargestellt. Die Findung einer Gesamtlösung erfolgt auf der Grundlage der qualitativen Bestimmung von Indikatoren und Einflussparametern. Durch die fehlende Beachtung Komponenten ist eine quantitative Bestimmung von Einflüssen auf das Arbeitssystem und den Werker nicht möglich. Eine Zuordnung von quantifizierbaren Beschreibungsparametern zu einzelnen Komponenten und Ausprägungsformen von Werkerinformationssystemen findet sich bei LUŠIĆ ET AL. (2016). Bei LUŠIĆ ET AL. (2016) erfolgt jedoch keine Zuordnung der aufgestellten Beschreibungsparameter auf eine ganzheitliche Morphologie, sondern lediglich auf unterschiedliche Systemausprägungen [32]. Darüber hinaus wird keine Möglichkeit aufgezeigt, wie eine quantitative Bestimmung der Beschreibungsparameter beispielsweise auf Basis des Modells von GEISER (1997) erfolgt [27].

Erkenntnisse über Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Werker und Arbeitssystem durch DAS finden sich hingegen in einer Vielzahl von Studien wieder, in welchen beispielsweise Einflüsse von Augmented Reality qualitativ und quantitativ untersucht worden sind. Auffällig dabei ist, dass eine Quantifizierung der Assistenzunterstützung in einer Test- und Evaluierungsphase eines Montagesystems (Mock-Up Phase) erfolgt ist [33] und ausschließlich einzelne DAS untersucht worden

sind, ohne auf die spezifische Morphologie DAS einzugehen [34], [35]. Dafür sind zwei Gründe anzuführen: Der erste Grund ist, dass es nur wenige Erkenntnisse über den Einsatz und den Nutzen DAS und deren einzelne Komponenten im Hinblick auf sich wechselseitig beeinflussende menschliche, technische und organisatorische Anforderungen [21] bekannt sind. Ein weiterer Grund ist die Schwäche aktueller Methoden und Werkzeuge des „Lean Management“, den Bedarf und die Anforderungen DAS bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung zu identifizieren [24]. Gegenwärtig erfolgt keine Planung und Evaluierung DAS in klassischen Phasen der Montageplanung. Dies wird in Abbildung 51 im Anhang verdeutlicht.

Vor diesem Hintergrund ist es Zielsetzung dieser Arbeit, ein Vorgehensmodell zu entwickeln, das es ermöglicht, unter Beachtung individueller Merkmale und Eigenschaften des Menschen (Werker) in Bezug auf sich dynamisch verändernde Anforderungen der Organisation (Arbeitsaufgabe), verschiedene DAS zu bestimmen, auf deren Grundlage eine quantifizierte Investitionsentscheidung für die Einführung eines DAS ermöglicht wird. Die Investitionsentscheidung basiert dabei auf quantifizierbaren Wirtschaftlichkeitskennzahlen von Werker und Arbeitssystem in der Montage unter Verwendung eines DAS. Dem MTO-Konzept folgend ist zur Beantwortung dieser Aufgabe eine systematische Identifikation und Analyse von Beschreibungsparametern, ihren Einflüssen und den Wechselwirkungen zwischen Mensch (Werker), Komponenten DAS (Technologie) und Arbeitsaufgaben in der Montage (Organisation) notwendig. Die gewonnenen Erkenntnisse sind anschließend innerhalb eines Regelwerks miteinander in eine quantifizierbare, wechselseitige Beziehung zu setzen, auf deren Grundlage ein Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage zu entwickeln ist. Das Vorgehensmodell folgt dabei der Anforderung einer Anwendung in frühen Phasen der Produktentwicklung und Arbeitsvorbereitung.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das Vorgehensmodell und der Aufbau dieser Arbeit basieren auf dem Design Science Research Methodology Process Model (DSRM) von PEFFER ET AL. (2007). Das DSRM ist dabei auf Basis eines 5-stufigen Designzyklus von TAKEDA ET AL. (1990) und der sieben Richtlinien von HEVNER ET AL. (2010) aufgebaut und erweitert [36], [37], [38].

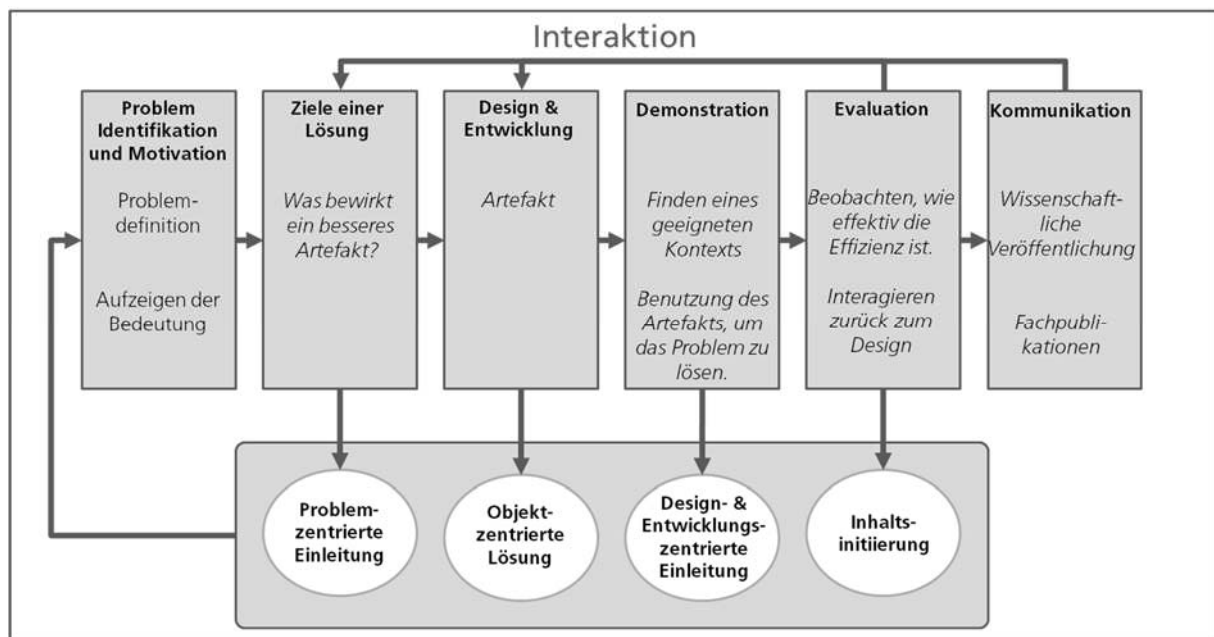


Abbildung 3: Design Science Research Methodology Process Model [1]

In Kapitel 1 erfolgt eine Darstellung der Ausgangssituation, der Motivation und Aufgabe dieser Arbeit sowie der methodische Aufbau und das Forschungsdesign. Grundlegende Begriffe, eine thematische Einordnung und Abgrenzung der Arbeit werden in Kapitel 2 dargestellt. Eine Darstellung des Stands der Forschung sowie des bestehenden Forschungsbedarfs wird in Kapitel 3 aufgezeigt. Die mit dieser Arbeit verfolgte Problemstellung, Zielsetzung, adressierte Forschungsfrage sowie Anforderungen zur Zielerreichung werden aus der Perspektive der Produktionswissenschaft und aus der Perspektive von Industrieanwendern in Kapitel 4 verdeutlicht. Angewendet wird neben Literatur-, Metadatenrecherche auch eine umfassende Desktop-Recherche.

Kapitel 5, 6 und 7 beschreiben die drei Schnittmengen des MTO-Konzepts im Hinblick auf zu planende und evaluierende Aspekte DAS in der Montage. Kapitel 5 analysiert zunächst technische Bestandteile DAS. Hierzu wird eine grundlegende Morphologie DAS aufgezeigt. Darauf aufbauend werden Eigenschaften und Merkmale DAS in Form von Beschreibungsparametern identifiziert und beschrieben. Die Beschreibungspara-

meter werden mittels Tendenzkennzahlen anschließend den Komponenten DAS zugeordnet. Es wird untersucht, auf welche Art und Weise eine Bestimmung auf der Grundlage von Tätigkeitsbeschreibungen manuell auszuführender Aufgaben in der Montage möglich ist. Hierzu wird die Methode MTM analysiert und erweitert. In Kapitel 6 wird der Mensch (Werker) in der Montage der Zukunft und dessen Einfluss auf unternehmensorganisatorische Zielsetzungen zur Anwendung DAS betrachtet. Eigenschaften und Beschreibungsparameter des Menschen werden identifiziert und im Hinblick auf Einflüsse und Wechselwirkungen der Intensität der Interaktion mit DAS beschrieben. Welche Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte einzelne Komponenten DAS in Bezug auf unternehmensorganisatorische Zielsetzungen der Anwendung DAS haben und welche Möglichkeiten einer quantitativen Bestimmung dieser Effekte bestehen, wird in Kapitel 7 dargestellt. Angewendet werden neben Literatur-, Metadaten- und Desktop-Recherche Methoden des Technologie- und Innovationsmanagements, Labor- und Beobachtungsstudien.

Kapitel 8 dieser Arbeit führt die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln in einem Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage zusammen. Dabei wird ein Regelwerk als Optimierungsproblem anhand eines Use Case dargestellt und beschrieben, das anschließend mathematisch formuliert und gelöst wird. Eine Validierung des entwickelten Vorgehensmodells erfolgt in Kapitel 9. Hierzu wird das Vorgehensmodell auf Basis eines Excel-basierten Proof-of-Concept-Demonstrators (PoC-Demonstrator) durch Anwendung in einem Labor sowie in einem Industrie Use Case validiert. Das Vorgehensmodell wird anschließend einer Sensitivitätsanalyse unterzogen und kritisch reflektiert. In diesem Zusammenhang werden neben einer Literaturrecherche, Meta- und Desktop-Recherche, Methoden aus dem Bereich Operation Research eingesetzt. Eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Arbeit erfolgt in Kapitel 10 zusammen mit einer kritischen Reflexion der dargestellten Zielsetzung und Forschungsfrage. Ergänzend erfolgt in Kapitel 10 ein Ausblick auf den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage. Abbildung 4 veranschaulicht die Struktur und den Aufbau dieser Arbeit entlang des DSRM. Wobei die Kommunikation den dargestellten Phasen parallel folgt.

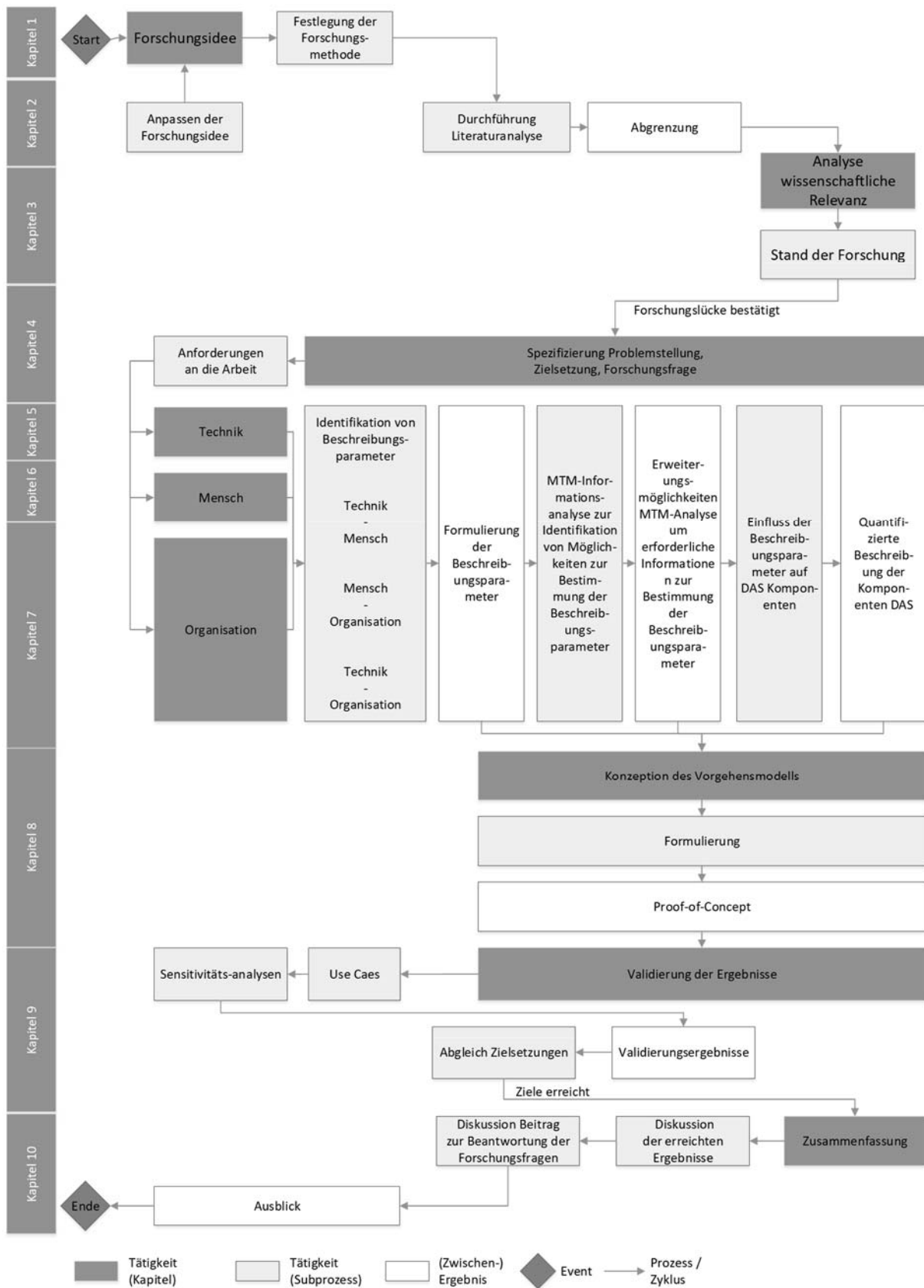


Abbildung 4: Struktur und den Aufbau dieser Arbeit (eigene Darstellung)

2 Definitionen, Bezugsrahmen und Abgrenzung der Arbeit

Dieses Kapitel beschreibt Herausforderungen von Montagesystemen der Zukunft (vgl. Kapitel 2.1) am Beispiel eines cyber-physischen Montagesystems (CPMS) und verdeutlicht die Relevanz und Bedeutung von digitalen Assistenzsystemen (vgl. Kapitel 2.2) im Hinblick auf eine menschengerechte und betriebswirtschaftlich sinnvolle Gestaltung. Die Begriffe CPMS und DAS werden dabei auf der Grundlage des wissenschaftlichen Diskurses definiert. Auf der Diversität DAS aufbauend wird der grundlegende Bezugsrahmen dieser Arbeit in Form des Mensch-Technik-Organisations-Konzeptes (MTO-Konzept) aufgezeigt und die Abgrenzung dieser Arbeit verdeutlicht (vgl. Kapitel 2.3).

2.1 Montagesysteme der Zukunft

In industriell produzierenden Unternehmen erfolgt die Montage vielfach als letzte Fertigungsstufe. Den Prinzipien des Lean Management folgend sind Montagesysteme auf den Kundentakt gerichtet auszurichten [39]. Der Materialfluss durch das gesamte industriell produzierende Unternehmen hindurch wird demzufolge vom Kunden gestartet und mit der Montage auf alle vorgelagerten Fertigungsstufen des Produktionsprozesses übertragen. Die Montage spielt daher die Rolle des Kunden. Dabei ist es das Ziel, den Materialfluss konstant zu halten, um nach Möglichkeit keine Pufferbestände zwischen den einzelnen Fertigungs- und Montagestufen entstehen zu lassen. Zur Realisierung dieses Fluss-Prinzips sind im Wesentlichen die Kapazitäts-Flexibilität in den Wertschöpfungsfunktionen und ein reagibles, dem Pull-Prinzip folgendes Logistik-System von zentraler Bedeutung [40].

Typische Flussprinzipien der Montage sind Hauptfluss, Nebenfluss und U-Linie, mit deren Hilfe es ermöglicht wird, dem Lean Prinzip – Pull – Folge zu leisten. Dabei determiniert das Flussprinzip die grundsätzliche Struktur der Montage. Abhängig von dem oder den zu montierenden Produkt/Produkten, der Mengen, Varianten und von den dafür erforderlichen Technologien, Hilfs- und Betriebsmitteln folgt eine systematische Strukturierung von Montagen, sogenannte Montagesysteme werden gebildet [41]. Die Anordnung der aufgeführten Flussprinzipien erfolgt geordnet nach steigender Flexibilität. Vor- und Nachteilen werden von LOTTER ET AL. (2012) dargestellt [16].

Bei einer Strukturierung von Montagesystemen sind die zu erbringenden Montageaufgaben und das geplante Produktionsprogramm die bestimmenden Eingangsinformationen. Die Montageaufgaben werden dabei aus der Struktur der zu montierenden Produkte und den vorhandenen oder neuen Montagetechnologien abgeleitet, indem das

Produkt schrittweise zerlegt wird. Über die Erstellung und Analyse der Strukturstücklisten entstehen sogenannte Montage-Vorranggraphen, die sich als gutes Hilfsmittel für die Strukturierung und Ausplanung von Montagesystemen erwiesen haben [16]. Die zentralen Strukturformen der Montage sind Linien-Montage, Montage-Insel, Einzelplatz-Montage, Baustellen-Montage sowie deren Organisationsformen One-Piece-Flow-Montage und Karee-Montage.

Durch steigende Produktindividualisierung wird in der produzierenden Industrie seit mehreren Jahrzehnten auch das Konzept des sogenannten Mixed Model Montagesystems (MMAS) angewendet [42], mit dem Ziel kapazitätsauslastend, flexibel und wandlungsfähig eine Vielzahl gleichartiger Produkte einer Produktfamilie, aber auch unterschiedliche Produkte verschiedener Produktfamilien zu montieren [43], [44]. Vielfach geht mit dem Konzept MMAS ein hoher Anteil von Montagetätigkeiten einher, deren Automatisierung nicht wirtschaftlich ist und daher vom Menschen durchgeführt wird. Die Werker haben den Anforderungen nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Konzepts der MMAS zu folgen, woraus ein erhöhtes Risiko einer kognitiven, psychischen aber auch physischen Belastung der Werker resultiert [43]. Vor allem in Hochlohnländern stehen Montagesysteme dabei vor der Herausforderung, steigende betriebswirtschaftliche Anforderungen effizient zu bewältigen [4]. Prozessabläufe in Montagesystemen, welche heute als vorteilhaft gelten, werden in Zukunft an ihre Grenzen stoßen [45]. Ohne den Aufwand für die Montageplanung und -steuerung überproportional zu erhöhen, erlauben klassische Montageformen keine weiteren Produktivitätssteigerungen [5]. Basierend auf technologischen Möglichkeiten einer modernen Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) sowie auf der Grundlage moderner Montagetechnologien wurden sogenannte CPMS realisierbar, wodurch veränderte und intelligente Formen der Montage entstanden sind. Diese sind in der Lage, sich effizient den individuellen Anforderungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht und gleichzeitig auch aus menschengerechter Sicht anzupassen [4].

Cyber-physische Systeme (CPS) realisieren eine Verbindung zwischen der physikalischen und der digitalen Welt. Dabei bauen CPS auf eingebetteten Systemen auf, welche über einen Sensor Daten einer physikalischen Umgebung erfassen, diese mittels eines Mikroprozessors verarbeiten und über Aktuatoren auf physikalische Vorgänge einwirken. Sie sind mittels digitaler Netze miteinander verbunden und greifen auf weltweit verfügbare Daten und Dienste zu. CPS sind als (technisch) nicht abgeschlossene Systeme definiert und sind durch einen hohen Grad der Vernetzung zwischen der physischen, sozialen und virtuellen Welt gekennzeichnet [1], [3]. Durch Integration von CPS in Montagesystemen entstehen CPMS. Es wird vorausgesagt, dass CPMS in der

Lage sein werden, Herausforderungen volatiler Märkte wirtschaftlich zu begegnen und gleichzeitig auf eine ergonomische und auf eine alters- und altersgerechte Arbeitsgestaltung einzugehen [4], [5], [45].

CPMS verfügen über Komponenten eines cyber-physischen Systems, mit deren Hilfe Montageprozesse ausgeführt werden können. Ein solcher cyber-physischer Montageprozess verfügt über mehrere Montageprozessreihenfolgen und erfordert keine Festlegung auf Montagestationen zur Ausführung einer Montageaktivität, um einzelne Bauteile zu einem Erzeugnis zusammenzuführen. Hierdurch ist ein flexibles Reagieren auf Gegebenheiten im Montagesystem oder auf geänderte Anforderungen im Produktentstehungsprozess möglich. Bauteile und Ressourcen verfügen in diesen Systemen über individuelle Bauteil- und Ressourceninformationen, welche eine digitale Repräsentation des physischen Montageprozesses darstellen [46].

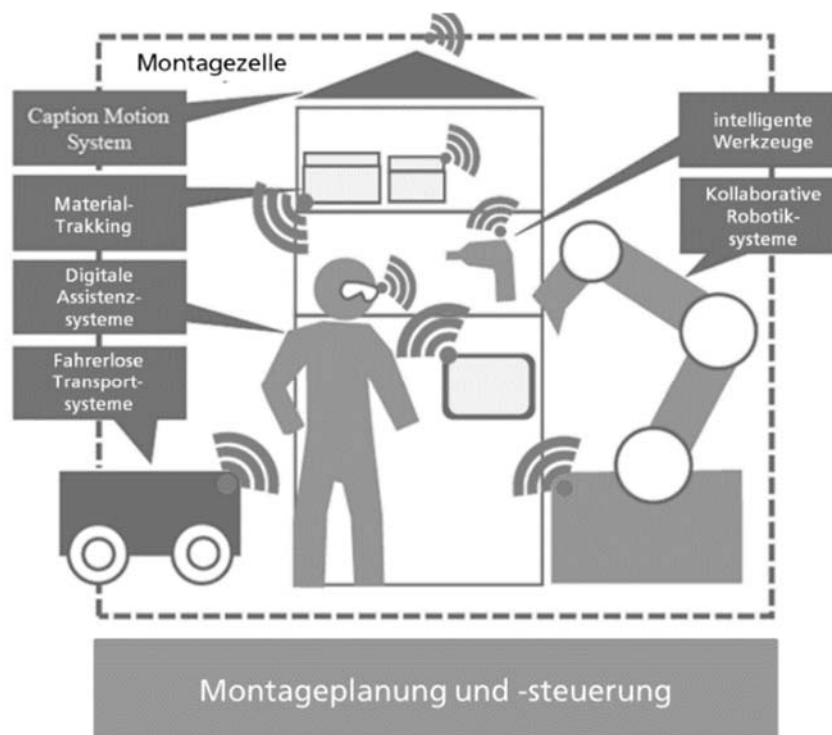


Abbildung 5: Cyber-physisches Montagesystem der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 [45]

Ein Beispiel für ein cyber-physisches Montagesystem wird in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 demonstriert, dessen Aufbau in Abbildung 5 schematisch dargestellt ist.

Das in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 realisierte Montagesystem baut auf drei mobil verbundenen Montagestationen auf, an denen unterschiedliche Varianten eines 3D-Druckers nach dem Prinzip einer „Mixed Model Montage“ in Losgröße 1 montiert

werden. Der Werker wird in diesem komplexen Montagesystem einerseits durch kooperative und kollaborative Robotik-Systeme und andererseits durch DAS mit unterschiedlichen technischen Funktionsausprägungen bei der Durchführung seiner Tätigkeiten unterstützt. Die gewonnenen Informationen werden dazu verwendet, Effekte zwischen der Produktivität des Montagesystems und den ergonomischen Belastungssituationen des Werkers zu analysieren mit dem Ziel, gewonnene Erkenntnisse in eine optimierte Montageplanung und -steuerung einfließen zu lassen. Das Montagesystem ist dabei in ein fabrikübergreifendes Produktionssystem eingebunden [45].

Durch den Einzug intelligenter Systemtechniken in das Arbeitssystem der Montage wird die Mensch-System-Interaktion deutlich erhöht. Abbildung 6 verdeutlicht grundsätzliche Einflüsse auf das Arbeitssystem durch Implementierung von Wirkprinzipien cyber-physischer Montagesysteme.

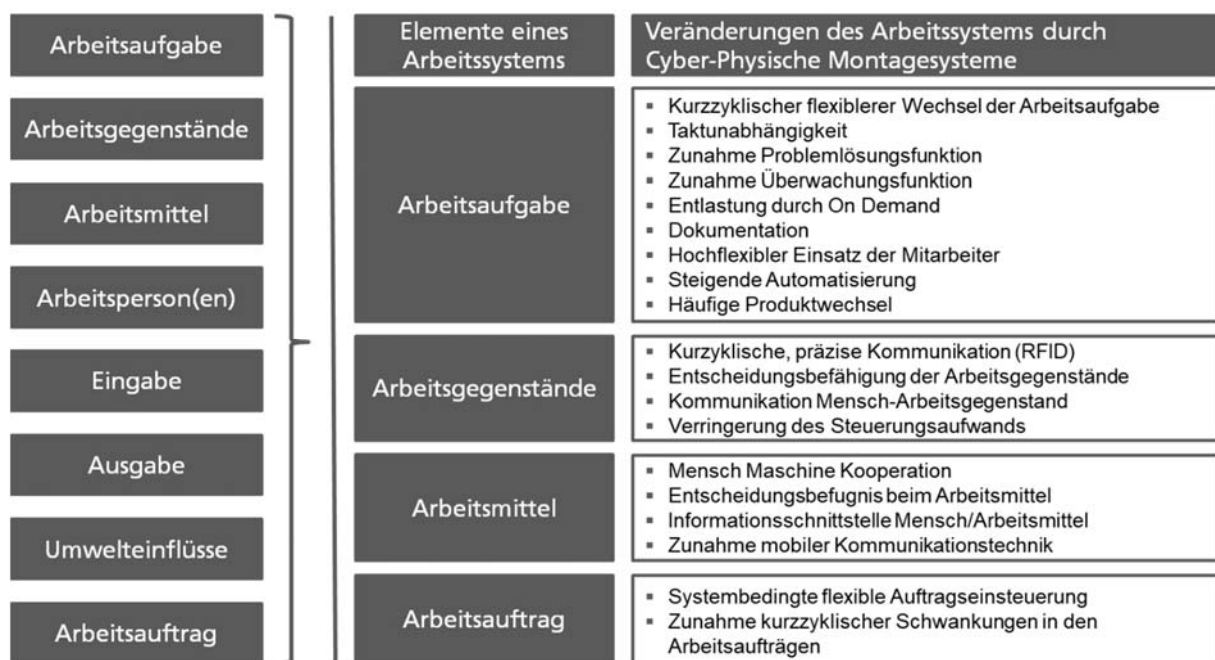


Abbildung 6: Veränderungen des Arbeitssystems durch CPMS [6]

Die funktionale und informationelle Distanz des Menschen zum Arbeitssystem, in dem der Mensch agiert, wird dabei vergrößert [7].



Abbildung 7: Veränderte Beanspruchungen des Werkers durch CPMS [6]

Die wissenschaftliche Literatur führt an, dass es im Arbeitssystem der Zukunft zu steigenden Beanspruchungen des Werkers kommen wird, vgl. Abbildung 7. Als Gründe dafür sind dabei vor allem der kurzzyklische Wechsel der Arbeitstätigkeiten, die Zunahme problemlösender Tätigkeiten, der hochflexible Werkereinsatz sowie der Gebrauch neuer Kommunikationstechniken anzuführen [6]. Die Integration von Assistenzsystemen in klassische Montagesysteme begegnet der steigender Beanspruchung von Workern [9] und führt dabei gleichzeitig zu einem steigenden Digitalisierungs- und Vernetzungsgrad, wodurch Assistenzsystemen eine zentrale Rolle im Kontext cyberphysischer Montagesysteme zukommt.

2.2 Digitale Assistenzsysteme in der Montage der Zukunft

Das Wort Assistenzsystem setzt sich aus den Begriffen Assistenz und System zusammen. Dabei bedeutet der Begriff Assistenz Mithilfe oder Beistand [47]. Der Begriff System benennt eine Gesamtheit von Objekten, welche in einem gesamtheitlichen Zusammenhang stehen und durch Wechselbeziehungen untereinander gegenüber der Umwelt abzugrenzen sind [48]. Es besteht die Möglichkeit, einen allgemeinen Assistenzbedarf, zum Beispiel in der Montage, als Diskrepanz zwischen Leistungsangebot eines Werkers und Anforderungen einer Arbeitsaufgabe zu definieren [9], [10]. Ein Assistenzsystem unterstützt den Werker bei der Ausführung seiner Tätigkeiten mit dem Ziel, die Diskrepanz zwischen dem Leistungsangebot des Werkers und der Leistungsanforderung, die dem Werker durch die Arbeitsaufgabe gestellt wird, zu minimieren beziehungsweise zu eliminieren. Dabei werden unter dem Begriff Assistenzsystem alle Technologien zusammengefasst, welche Werker bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten unterstützen und es ihnen ermöglichen, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren [49]. Dabei stellen Assistenzsysteme eine Art Regler dar, um zum einen

Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätssteigerungen und zum anderen ergonomisch abgesicherte Prozesse zu erzielen. Entsprechende Assistenzsysteme, welche einem Werker individuelle Assistenz zur Verfügung stellen, identifizieren über unterschiedliche Sensorik-Systeme Informationen über den Werker, den Tätigkeitsfortschritt und die Tätigkeitsqualität aus einem Arbeitssystem mit dem Ziel, durch Bereitstellung einer adäquaten Assistenzleistung zu reagieren. Diese Formen von Assistenzsystemen sind komplex und investitionsaufwendig [12].

Grundsätzlich werden zwei Formen von Assistenzsystemen unterschieden. Zum einen eine technische Assistenz, beispielsweise in Form eines kooperierenden oder kollaborierenden Robotik-Systems [50] und zum anderen in Form informationstechnischer Assistenzsysteme. Dabei ist es das Ziel beider Formen, die Diskrepanz zwischen der menschlichen Leistungsfähigkeit und der von einer Arbeitsaufgabe geforderten Leistungsanforderung zu minimieren und die Wirtschaftlichkeit und Produktivität des Werkers aber auch des gesamten Arbeitssystems zu sichern. Assistenzsysteme gleichen demnach Leistungsanforderungen und die individuelle menschliche Leistungsfähigkeit des Werkers aus [9].

In der wissenschaftlichen Literatur sind informationstechnische Assistenzsysteme mit unterschiedlichen Begriffen angeführt. Die folgende Tabelle verdeutlicht die unterschiedlich verwendeten Begriffsbezeichnungen und -definitionen.

Tabelle 1: Verschiedene Begriffsverwendung informationstechnischer Assistenzsysteme (eigene Darstellung)

Begriffe	Definition
Assistenzsystem (AS)	Assistenzsysteme dienen dem Nutzer zur Unterstützung in bestimmten Situationen oder bei bestimmten Handlungen. Die Voraussetzung dafür ist eine Analyse der gegenwärtigen Situation und gegebenenfalls darauf aufbauend eine Vorhersage der zukünftigen Situation. Der Aspekt der Mobilität ist dann gegeben, wenn in dieses Assistenzsystem mobile Geräte eingebunden sind. Die Herausforderung hierbei ist trotz möglicher Verbindungsverluste des mobilen Geräts weiterhin eine adäquate Unterstützung anbieten zu können [51].
Mitarbeiterinformationssysteme (MIS)	Mitarbeiterinformationssysteme (MIS) vereinen Teilbereiche des Informationsmanagements und des Wissensmanagements. Mit ihnen wird gewährleistet, dass Werkerinformation zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Form dem Werker, assoziiert zur aktuellen Tätigkeit, zur Verfügung gestellt wird. MIS unterstützen die Entwicklung von individuellem zu kollektivem Wissen (Wissensverteilung) sowie die Umwandlung von implizitem in explizites Wissen (Externalisierung). Darüber hinaus leisten sie einen Beitrag zur Wissensnutzung und Wissensbewahrung. Ferner erheben sie den Anspruch, die Verteilung und Darstellung der Informationen in möglichst effizienter Weise zu ermöglichen. Synonym zum Begriff Mitarbeiterinformationssystem werden auch, konkret bezogen auf Produktionsaufgaben, die Bezeichnung Werkerinformationssystem (WIS) und Werkerführung (WF) verwendet [32], [52].

Kognitives Assistenzsystem (KAS)	Ein kognitives Assistenzsystem ist ein technisches System, das auf Basis wesentlicher Anteile an geeignet dargestelltem Wissen Schlüsse ziehen kann, aus seinen Erfahrungen lernt, so dass es morgen besser arbeitet als heute [10], [21].
Interaktives Assistenzsystem (IAS)	Unter dem Begriff „interaktiver Assistenzsysteme“ (IAS) versteht man ein mobiles Endgerät oder einen Wearable Computer, welcher mit einer Rückkopplungseinheit zur Ausgabe von visuellen, akustischen und auch haptischen Informationen an den Benutzer verbunden ist. Dabei kann die Rückkopplungseinheit auch in einen Wearable Computer, also in ein am Körper getragenes Computersystem, welches weder Aufmerksamkeit noch Flexibilität des Benutzers beeinträchtigt, integriert sein [13], [53].
Visuelle Assistenzsysteme (VASS)	System, das den Werker direkt am Arbeitsplatz mit einer virtuellen Montageanleitung und wichtigen Hinweisen unterstützt [54], [55], [55].
Digitale Assistenzsysteme (DAS)	Als DAS werden innovative Technologien und Anwendungen verstanden, die den Menschen in seinem Alltag bzw. im Betrieb bei der Ausführung seiner Tätigkeiten kognitiv unterstützen [13]. Hierbei ist eine nachhaltige Interaktion des Menschen mit dem Informationssystem auf der einen Seite und der Montageperipherie (Hilfs-, Betriebsmittel, Werkzeuge, Automaten) auf der anderen Seite zu berücksichtigen [14].

Im Folgenden wird der Begriff „Digitales Assistenzsystem“ (DAS) nach der in Tabelle 1 angeführten Definition verwendet. Hiernach werden im Folgenden DAS als innovative Technologien und Anwendungen definiert, welche den Menschen bei der Ausführung von Montagetätigkeiten Tätigkeiten kognitiv unterstützen [13]. DAS ermöglichen es dabei eine nachhaltige Interaktion des Menschen mit dem Informationssystem auf der einen Seite und der Montageperipherie (Hilfs-, Betriebsmittel, Werkzeuge, Automaten) auf der anderen Seite zu berücksichtigen [14]. Diese Definition ist als verbindende Definition von AS, MIS, KAS, IAS und VASS (vgl. Tabelle 1) zu verstehen und verdeutlicht, dass moderne DAS über eine reine kognitive und informationstechnische Assistenzleistung hinausgehen, indem DAS nicht nur in direkter Interaktion mit Informationssystemen, sondern auch in direkter Interaktion mit weiteren technischen Systemen, wie Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeuge oder mit technischen Automatisierungssystemen stehen. Dies verdeutlicht die funktionale sowie technische Diversität DAS.

2.3 Bezugsrahmen und Abgrenzung der Arbeit

Der Bezugsrahmen dieser Arbeit ist auf das Mensch-Technik-Organisations-Konzept (MTO-Konzept) bezogen. Das MTO-Konzept ist als soziotechnisches Analyse-, Bewertungs- und Gestaltungskonzept zu verstehen, in welchem Mensch, Technik und Organisation im Hinblick auf die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe in einer abhängigen Wechselwirkungsbeziehung zueinander stehen [58].

Das MTO-Konzept verdeutlicht, dass eine Anwendung neuer Technologien in einem Industrieunternehmen lediglich dann zu dem angestrebten Erfolg führt, wenn technische, menschliche und organisatorische Aspekte in einem ausgewogenen Verhältnis zu einander stehen. Hierbei sind folgende Schnittmengen zu unterscheiden [58]:

- Mensch und Technik: Diese Schnittmenge adressiert die Mensch-Maschinen-Interaktion, beziehungsweise die Schnittstelle zwischen Mensch-Maschine
- Mensch und Organisation: Diese Schnittmenge adressiert die Rolle des Menschen, hier im Arbeitssystem der Montage
- Technik und Organisation: Diese Schnittmenge adressiert das soziotechnische System, dies bedeutet die Organisation von Menschen (Werkern) und mit diesen verknüpften Technologien im Arbeitssystem der Montage, welche in einer bestimmten Weise strukturiert sind, um ein spezifisches Ergebnis, hier den Montageauftrag, zu produzieren.

Mit einer MTO-Analyse auf Unternehmensebene wird eine große Transparenz über Industrieunternehmen gewonnen. Dies erfolgt auf einer prozessorientierten Auftragsdurchlaufanalyse und einer strukturbezogenen Analyse, innerhalb welcher Gegenstände beachtet werden, welche bei ULRICH (2013) im Detail zu finden sind. Innerhalb des MTO-Konzeptes erfolgt die Bezugsspezifikation dieser Arbeit auf Grundlage folgender, von ULRICH (2013) genannter Gegenstände: Personalqualifikationen im Kontext Mensch, Komponenten DAS im Kontext Technik und Unternehmensziele, Gestaltung des Arbeitssystems, Produkte und Produktvarianten im Kontext der Organisation [60], welche im Zuge des zu entwickelnden Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS in Zusammenhang mit der Aufgabe zu setzen sind.

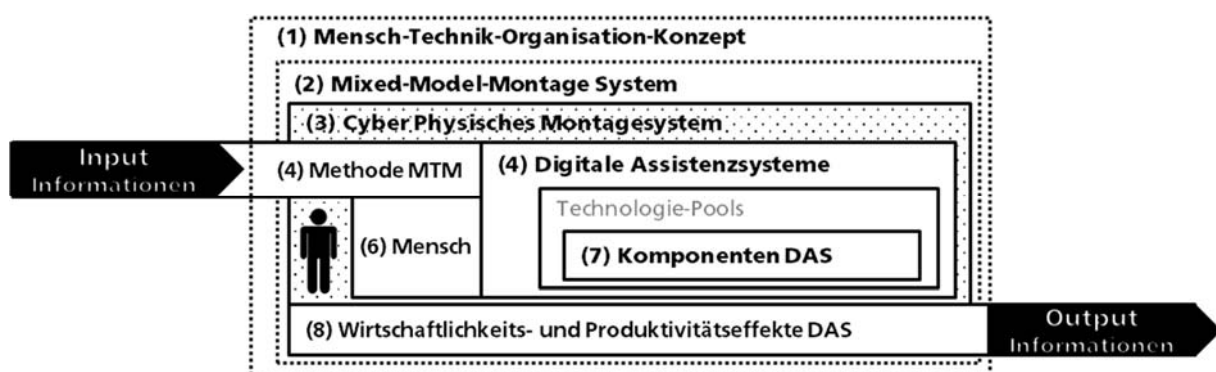


Abbildung 8: Bezugsrahmen (1 – 8) der Arbeit (eigene Darstellung)

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, liegt der weitere Fokus auf der Mixed-Model Montage (vgl. Bezugsrahmen (2) in Abbildung 8), welche auf Grund hoher Dynamik wechselnder Aufgabentätigkeiten, steigender Komplexität und steigendem Risiko kognitiver

Werker Belastungen durch cyber physische Systeme (vgl. Bezugsrahmen (3) in Abbildung 8) ergänzt wird, in welchen DAS einen zentralen Stellenwert einnehmen. Die Definition DAS in Kapitel 2.2 verdeutlicht in Zusammenhang mit Abbildung 1, dass DAS im Arbeitssystem der Montage eine Form kooperativer, rechnergestützter Arbeit darstellen [61] und eine hohe Vielfalt an verschiedenen Komponenten aufweist. Vor diesem Hintergrund gilt es im Rahmen dieser Arbeit, das MTO-Konzept (vgl. Bezugsrahmen (1) in Abbildung 8), als Paradigma für eine ausgewogene Gestaltung von DAS (vgl. Bezugsrahmen (4 und 7) in Abbildung 8) [21] zu berücksichtigen und anzuwenden [62]. Die Arbeitsaufgabe, dargestellt auf Basis der Methode MTM² (vgl. Bezugsrahmen (4) in Abbildung 8), verknüpft soziale Aspekte mit technischen Aspekten DAS und verbindet Menschen (vgl. Bezugsrahmen (6) Abbildung 8) mit organisationalen Strukturen und Unternehmenszielen [59], [60]. Die Unternehmensziele sind dabei auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseinflüsse DAS in der Montage bezogen, indem wesentliche Kosten- und Nutzeneffekte quantifiziert gegenübergestellt werden (vgl. Bezugsrahmen (8) in Abbildung 8). Um Kosten- und Nutzeneffekte im Hinblick auf eine Investitionsentscheidungsunterstützung bereits in frühen Phasen der Arbeitsvorbereitung anwendungsorientiert zu treffen, stellt die Nutzung von Informationen zur Arbeitsaufgabe aus frühen Phasen der Produktentwicklung (PEP) einen weiteren Bezug dar, was ebenso durch die Methode MTM ermöglicht wird [63] (vgl. Bezugsrahmen (8) in Abbildung 8).

Entsprechend des oben aufgezeigten Bezugsrahmens dieser Arbeit sind spezifische arbeitspsychologische sowie spezifische organisationspsychologische Aspekte, wie bei ULRICH (2013) beschrieben [60], abzugrenzen. Akzeptanz-, Usability und weitere Nutzer- beziehungsweise Anwenderspekte werden in dieser Arbeit zwar in Bezug auf das MTO-Konzept aufgegriffen und verdeutlicht, jedoch nicht aus arbeitsmedizinischer sowie arbeitswissenschaftlicher Sicht weiter vertieft. Ferner werden grundlegende Vernetzungs- und Kommunikationsschnittstellen in dieser Arbeit zwar betrachtet, jedoch grenzt sich diese Arbeit zu weiteren technisch spezifischen Aspekten in Bezug auf mögliche technische Interoperabilitäten und Synergieeffekten DAS zu bereits vorhandenen Informations- und Datentechnischen-Systemen von Industrieunternehmen ab. Informationssysteme, wie Product-Lifecycle-Management- (PLM) beziehungsweise Produktlebenszyklusmanagement-Systeme, Enterprise-Resource-Planning (ERP) Systeme oder aber auch Manufacturing Execution Systemen (MES) werden aus Informationssicht nicht betrachtet und sind abzugrenzen.

² MTM (Methods-Time Measurement) ist ein Verfahren zur Analyse und Planung von Arbeitsabläufen sowie zur Ermittlung von Plan- und Vorgabezeiten [63].

3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der gegenwärtige Stand der Forschung bezugnehmend auf Ziele und Funktionen (Kapitel 3.1), Gestaltungsfelder (Kapitel 3.2) sowie bezugnehmend auf Methoden und Vorgehensmodellen (Kapitel 3.3) aufgezeigt. Auf Grundlage der festgelegten Abgrenzungsbereiche dieser Arbeit erfolgt anschließend eine Analyse des aktuellen Forschungsbedarfs (Kapitel 3.4).

3.1 Ziele und Funktionen digitaler Assistenzsysteme

DAS haben in der Montage die zentralen Ziele, Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Produktivität sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus menschengerechter Sicht in der manuellen Tätigkeitsausführung zu erhöhen, indem DAS über die an den Werker zur Ausführung adressierten Tätigkeiten informieren und den Werker bei der Wahrnehmung und der Ausführung unterstützen. Hierbei sind die folgenden zentralen Zielsetzungen anzuführen [10], [21], [57]:

- Reduzierung der Ausführungszeit
 - Reduzierung des Aufwands zur Informationsbeschaffung und -verarbeitung
 - Reduzierung von Suchzeiten
 - Reduzierung von Dokumentationstätigkeiten
 - Reduzierung von Einstelltätigkeiten (Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeuge)
- Reduzierung der Einlern- und Trainingszeit
- Reduzierung von menschlichen Montagefehlern

Das Ziel der Reduzierung des Aufwands für die Informationsbeschaffung und -verarbeitung adressiert die Funktionen DAS, dem Werker die Möglichkeit zu geben, auf erforderliche Informationen, wie beispielsweise Zugriff auf Informationen über Produkt, Auftrag, die erforderlichen Tätigkeits-, Prozess- und Ablaufausführungen sowie über Qualitätsanforderungen zu haben. Dieser Zugriff erfolgt dabei zum richtigen Zeitpunkt und mit der richtigen Informationstiefe, -breite und -qualität. Durch diese Funktion DAS wird zudem eine papierlose Montagesteuerung ermöglicht. Das Handling von Papier wird auf diese Weise reduziert oder eliminiert. Ergonomische Belastungen werden hierbei in Form kognitiver Entlastungen reduziert. Darüber hinaus liefern DAS einen positiven Beitrag zur Reduzierung von Suchzeiten nach Materialentnahme-, Materialverbaustellen sowie nach Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen. DAS leisten

darüber hinaus einen Beitrag zur Reduzierung von Einlern- und Trainingszeiten. Diesen Funktionen kommt vor allem vor dem Hintergrund steigender kundenindividualisierter Montageaufträge (Losgröße 1 folgend) eine zentrale Bedeutung zu. Durch entsprechende Funktionen DAS bestehen Möglichkeiten, dass DAS Betriebs-, Hilfsmittel und Werkzeuge, welche bei Ausführung von Tätigkeiten benötigt werden, automatisch und synchronisiert auf die auszuführende Tätigkeit eingestellt (parametrisiert) werden. Durch diesen Automatismus werden Tätigkeiten, wie beispielsweise das manuelle Einstellen eines Schraubers auf den für eine Tätigkeit erforderlichen Drehmoment und -winkel, obsolet. Diese Funktion DAS ist grundsätzlich auf jede speicherprogrammierbare Steuerung von Betriebs-, Hilfsmitteln, Werkzeugen oder gar (Halb-) Automaten mittels Postprozessoren [64] übertragbar. Auf diese Weise liefern DAS einen positiven Beitrag zur Reduzierung von manuellem Aufwand bei Einstelltätigkeiten von Hilfs-, Betriebsmitteln, Werkzeugen und (Halb-) Automaten.

Durch die technischen Möglichkeiten zur Synchronisierung von Informationen zwischen realen Tätigkeitsausführungen von Werkern und dem datenbasierten Informationsverarbeitungssystem eines DAS sowie der Integration von Betriebsmitteln und Werkzeugen (vgl. oben) können Informationen über aktuelle Zustände einer Tätigkeitsausführung generiert und entsprechend analysiert und dokumentiert werden. Darüber hinaus bestehen Möglichkeiten, durch Anbindung zum Beispiel von Messinstrumenten, die bei der Tätigkeitsausführung (in-Line Test) zum Einsatz kommen, Messwerte direkt zu verbuchen (protokollieren) und der ausführenden Tätigkeit zuzuordnen. Bei entsprechender Granularität der Datenverarbeitung und Speicherung sind diese Daten sowohl mit dem Montageauftrag als auch mit Informationen für den ausführenden Werker verknüpfbar. Eine klare Prozessdokumentation ist auf diese Weise realisierbar. So liefern DAS auch einen positiven Beitrag zur Reduktion von Dokumentationsstätigkeiten. Die gespeicherten Daten stehen in Folge dem Qualitätsmanagement und dem kontinuierlichen Verbesserungsmanagement zur Verfügung. Durch weiterführende Verwendung beispielsweise von Methoden des Deep-Learning [65] kann auf diese Weise das Informationssystem des DAS mit Wissensmanagementsystemen verbunden werden, wodurch ein Wissensmanagement im Kontext der digitalen Transformation möglich wird [66].

Die dargestellten Möglichkeiten zur Synchronisierung physischer und digitaler Prozesse eines Arbeitssystems können dazu beitragen, Montagefehler und deren Folgekosten zu reduzieren, indem während der Tätigkeitsausführung durch ein entsprechendes algorithmisches Regelwerk Informationen und Daten zur Ist-Ausführung kontinuierlich mit Informationen und Daten zur Soll-Ausführung verglichen werden. Weicht

die Ist-Ausführung von der Soll-Ausführung ab, generiert ein DAS eine entsprechende Information, welche an den Werker kommuniziert wird und Informationen zur Korrektur enthält. Betriebsmittel und Werkzeuge werden dem erforderlichen Korrekturprozess entsprechend parametrisiert. Hierzu stehen unterschiedliche Methoden des Complex-Event-Processing zur Verfügung [67].

WIESBECK (2014) zeigt auf, dass die Funktionen DAS weit über reine Informationsbereitstellung und -anzeige hinausgehen [10] und dass die Systeme den Ansprüchen einer effizienten Interaktion mit dem Werker, unter Beachtung der aktuellen Arbeitstätigkeit und der für die Tätigkeit benötigten Gegenstände und Objekte (Betriebsmitteln und Werkzeugen) im Arbeitssystem Folge zu leisten haben. Von zentraler Relevanz sind bei DAS daher Funktionen zur Identifikation des Montageschrittes sowie zur Identifikation des Montagefortschritts / des Montagestatus. Dafür ist eine Informationsbereitstellung über produktspezifischen Montagereihenfolgen erforderlich [10].

Um Montagefehlern mit entsprechenden Reaktionen zu begegnen, was zum einen über eine visuelle Informationsbereitstellung und -anzeige (oder über eine Interaktionsreaktion eines technisch verknüpften Betriebsmittels- oder Werkzeuges) erfolgen kann, sind entsprechende Steuerungsbefehle (Codes) zu generieren oder abzurufen und über entsprechende Kommunikationsschnittstellen an das technische Hilfs-, Betriebsmittel oder Werkzeug zu adressieren, und dem Informationssystem echtzeitorientierte Informationen aus dem Tätigkeitsprozess des Werkers über Sensoren bereitzustellen. Neben Informationen, ob ein Material richtig aufgenommen und das Material richtig montiert und auf dem richtigen Werkstückträger bearbeitet wurde, besteht die Möglichkeit, weitere Informationsquellen und -senken mit dem DAS zu verbinden. Überprüfungen, ob ein Hilfs-, Betriebsmittel oder Werkzeug richtig verwendet wurde, sind so realisierbar. Um entsprechende Informationen beziehungsweise Daten zu gewinnen, um zu prüfen, ob eine geforderte Soll-Arbeitsmethode im Vergleich zur Ist-Arbeitsmethode auch richtig eingehalten wurde, oder ob ein Reaktionsbedarf des DAS notwendig ist, sind entsprechende Datenanalysen durchzuführen.

Darüber hinaus sind DAS an individuelle Anforderungen von Werkern anpassbar. Dies setzt vor allem eine individuelle Informationsrepräsentationsform, beziehungsweise Mediendarstellung und -ausgabeform voraus. Diese Medien- und Ausgabeformen sind zu generieren. Entweder automatisch aus vorhandenen Informationsquellen, dafür ist eine datentechnische Input-Schnittstelle zwischen vorhandenen Informations- und Softwaresystemen, wie beispielsweise zwischen ERP-Systemen, CAD-Systemen und dem Informationsverarbeitungssystem des DAS notwendig. Oder die Arbeitsvorberei-

bank zur Verwendung bereitzustellen. Ein pragmatischer Weg, diese Aufgabe zu erfüllen, ist eine manuelle Erstellung. Dies erfolgt zumeist durch die Arbeitsvorbereitung unter Verwendung von formulierten, textbasierten Arbeitsanweisungen. Die meisten DAS werden mit systemspezifischen grafischen Editor-Softwaretools geliefert, um generierte Informationen in einer Datenbank entsprechend bereitzustellen [68]. Die Erstellung und Übertragung geeigneter Mediendateien in eine Datenbank ist ein zeitaufwendiger Prozess. Darüber hinaus ist dieser Prozess mehrmals zu wiederholen, sobald eine Produktvariante oder ein Produktmerkmal geändert wird [57]. Ein weiterer Ansatz verfolgt die Verwendung von ergonomisch optimierten Utility-Video-Sequenzen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Videosequenzen mit linearem (statischem) Verlauf besteht eine Utility-Video-Sequenz aus einer Clip-Struktur mit Sequenzgabeln (dynamisch), die es dem Assistenzsystem ermöglicht, sich an die Bedürfnisse, Erfahrungen und Lerngewohnheiten des Bedieners anzupassen [69]. Hier ist der Erstellungsaufwand hoch, da jede Montagefolge mit speziellen Hard- und Softwaregeräten zu erfassen ist. FUNK ET AL. schlagen ein „Programming by Demonstration“-Konzept vor, welches Arbeitsschritte automatisch erkennt und eine semantisch umfangreiche Montageanleitung erstellt, während eine Montage mit einer Tiefenkamera zur Bewegungsaufzeichnung und einem Projektor als interaktives Gerät durchgeführt wird [70].

3.2 Gestaltungsfelder digitaler Assistenzsysteme

Um eine grundlegende Struktur zur Planung und Evaluierung DAS zu verdeutlichen, werden im Folgenden zunächst die zentralen Gestaltungsfelder DAS aufgezeigt und genauer betrachtet. DAS sind nach folgenden Leitfragen beschreibbar [71], [72], [31]:

- Was wird übermittelt (Information)?
- Wie (in welcher Weise) wird übermittelt?
- Womit wird übermittelt?
- Wann wird übermittelt?
- Wo wird übermittelt?
- An wen wird übermittelt?

Diesem Leitfragen entsprechend ergeben sich drei wesentliche Gestaltungsfelder DAS im Zuge des Designs und der Implementierung, welche unterschiedliche Ausprägungsmöglichkeiten umfassen und im Folgenden genauer dargestellt sind [21]:

- Informationsgrad, was (Degree)
- Informationspräsentation, wie (Design)
- Informationsübertragung, womit (Device)

Informationsgrad was (Degree): In dem Gestaltungsfeld Degree wird eine Entscheidung über Art und Menge der bereitgestellten Informationen getroffen. Nach LANG (2007) lassen sich in der Montage folgende Informationsarten unterscheiden [52]:

- Produktbezogene Informationen beziehen sich auf Produkteigenschaften, wie beispielsweise Stücklisten oder Sachnummern des zu montierenden Teils / der Baugruppe.
- Auftragsbezogene Informationen umfassen Daten zur Auftragsabwicklung, wie zum Beispiel Stückzahlen, Kunde, Fälligkeitstermine.
- Tätigkeits- und prozessbezogene Informationen leiten den Werker hinsichtlich der Verrichtungsweise seiner Tätigkeit, wie beispielsweise in Bezug auf die Reihenfolge der zu montierenden Teile / Baugruppen oder in Bezug auf Hinweise zur Verwendung der notwendigen Betriebsmittel.
- Ablaufbezogene Informationen beschreiben Prozesse übergeordneter organisatorischer Ebenen, wie beispielsweise die innerbetriebliche Materialflussregelung zur Anlieferung der zu montierenden Teile / Baugruppen an die Arbeitsstation.
- Qualitätsbezogene Informationen stellen eine Detaillierung der Informationsarten und somit eine Querschnittsgruppe dar. Sie heben wichtige Punkte zur Sicherstellung der Produktqualität hervor, wie Prüfanweisungen.
- Allgemeine Informationen gruppieren, wie beispielsweise Schichtpläne.

Für den Werker in einer variantenreichen Serienmontage sind zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe vor allem produkt-, tätigkeits- und prozessbezogene Informationen relevant, welche über das DAS übermittelt werden. Der zweite Gestaltungsparameter ist die Informationsmenge. Hiermit wird determiniert, wie detailliert die Informationen sein sollen.

Informationspräsentation wie (Design): Dieses Gestaltungsfeld bezeichnet die Präsentationsweise sowie die Präsentationsform der Informationen. Unterschiedliche Präsentationsformen und unterschiedliche Präsentationsweisen sind hierbei auch in Kombination anwendbar. Dabei stehen, abhängig vom Sinn, verschiedene Modi der Informationsdarstellung zur Auswahl, wie visuelle oder auditive Kanäle [21].

Informationsübertragung womit (Device): In diesem Gestaltungsfeld ist die Übermittlungsform adressiert, mit der die Information angezeigt beziehungsweise womit mit

dem Werker interagiert wird. Je nach Übermittlungsform gibt es unterschiedliche Übertragungsmedien [21]. Da sich diese Arbeit auf DAS bezieht, wird im Folgenden ausschließlich auf digitale Übermittlungsformen eingegangen, welche entweder auf einem Endgerät (Device) dem Werker Informationen anzeigen, oder mit denen Werker zum Beispiel in einer Mensch-Roboter-Kollaboration interagieren. Die Interaktionstechnologie (Device oder auch technisches System) lässt dabei unterschiedliche Interaktionen oder Rückmeldungen zu. Implementiert werden vor allem mechanische Varianten, bei denen die Interaktion mit dem Assistenzsystem über Berührung oder Druck erfolgt (bspw. Touchscreens, Tastaturen). Im Privatbereich sind auditive (Sprachsteuerung) und visuelle (Gestensteuerung) Interaktionen verbreitet, die bereits auch im Industriebetrieb umgesetzt werden können. Den Schwierigkeiten einer Spracherkennung oder Gestenerkennung in einer lauten Umgebung stehen wirtschaftlichkeits- und produktivitätssteigernde Potenziale gegenüber. Eine Sprachsteuerung ermöglicht beispielsweise Arbeiten mit beiden Händen, Steuerung mit Gesten ermöglicht die Reduktion von Wegezeiten hin zum Eingabegerät [73].

Bei Assistenzsystemen kann die Unterstützung unterschiedlich stark ausfallen. Der vermehrte Einsatz von Sensorik und Datenverarbeitung im Zuge der Industrie 4.0 wirft die Frage nach der Ausprägung von Adaptivität des Werkerinformationssystems auf [74]. Adaptive Werkerinformationssysteme stellen abhängig vom Werker, seiner Arbeitsaufgabe und seinem Produktionsumfeld Arbeitsanweisungen zur Verfügung. Auf diese Weise erfährt der Werker maximale Unterstützung bei der Informationseinkholung. Er kann aber gleichzeitig auch vom System bevormundet werden, was zu mangelnder Akzeptanz führen kann. Adaptierbare Werkerinformationssysteme halten die Informationen bereit, geben sie aber nur auf Nachfrage des Werkers aus oder können in ihrer Gestaltung (zum Beispiel Informationsmenge) vom Werker parametrisiert werden. Somit wird der Werker nicht vom System getrieben. Er hat aber einen erhöhten Bedienungsaufwand und holt möglicherweise falsche Informationen ein. Entscheidend für den Erfolg eines Werkerinformationssystems ist die effiziente Information der Werker über die von ihnen verlangten Tätigkeiten [21].

Ein weiteres, zentrales Gestaltungsfeld ist die Informationsverarbeitung (Data-Processing) und das dahinterstehende Softwaresystem. Dieses Gestaltungsfeld adressiert das Informationsverarbeitungssystem, welches sämtliche Daten orchestriert, verarbeitet und je nach Informationsrepräsentationsbedürfnis die auszugebenen Informationen generiert sowie die Informationen an die entsprechenden Ausgabegeräte (vgl. Device) kommuniziert [75], [76]. Hierzu sind Schnittstellen zu definieren und umzusetzen [77].

3.3 Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme

Dieser Kapitelabschnitt stellt in Bezug auf den grundlegenden Untersuchungsrahmen aktuell vorliegende wissenschaftliche Erkenntnisse zur Planung und Evaluierung DAS dar und fasst den aktuellen Forschungsbedarf sowie dessen Relevanz zusammen. Initialisierend werden im Folgenden zentrale Planungsaspekte und Anforderungen DAS beschrieben, um einen grundsätzlichen Überblick über den Planungsumfang DAS darzustellen [30], [78]:

- Informationen zu einer Aufgabenstellung: Um fehlerfrei und in einer vorgegebenen Zeit wechselnde Produktvarianten zu montieren, ist es erforderlich, dass Werker eine Möglichkeit erhalten, ein zugeführtes Werkstück unmittelbar zu identifizieren, die variantenspezifischen Arbeitsvorgänge zu erkennen, die korrekten Teile und Komponenten zur Durchführung der Arbeitsvorgänge auszuwählen und die richtige Arbeitsmethode sowie die richtigen Werkzeuge zur Anwendung zu bringen.
- Darstellungsmedien: Die Darstellung von Informationen in Arbeitssystemen erfolgt zum Beispiel durch mobile elektronische Endgeräte (Devices), wie Tablet-Computer, Datenbrillen, Smart Watches oder mobile Projektoren, welche eine dezentrale Verfügbarkeit digitaler Informationen direkt im Arbeitssystem ermöglichen. Devices bilden eine physische Mensch-Maschine-Schnittstelle und sind daher aus ergonomischer Sicht von hoher Relevanz. Tablet-Computer und herkömmliche Monitore sind dann geeignet, wenn ein hoher Informationsbedarf für einen einzelnen Arbeitsschritt, eine hoch skalierte Darstellung und ein vollständig freies Sichtfeld des Werkers gefordert sind. Einen steigenden Verbreitungsgrad weisen auch am Körper getragene Geräte wie Head-Mounted-Displays (HMD) auf. Ihre wesentlichen Vorteile liegen darin, dass ihr Display sich zu jeder Zeit in unmittelbarer Nähe zum Sichtfeld des Werkers befindet und dieser sich nicht zu einem ortsfest installierten Monitor begeben muss, um Informationen zu erfassen. Er hat beide Hände frei für die Montagetätigkeiten [16], [41], [79]. Des Weiteren verfügen HMD über diverse Zusatzfunktionen, wie Bildaufnahme, Tonausgabe, Gestenerkennung oder Lesen/Scannen von 1D- und 2D-Barcodes.
- Informationstiefe: Informationsdarstellungsmedien sind dem jeweiligen Montageschritt und der benötigten Informationstiefe entsprechend auszuwählen. An dieser Stelle sind vier Informationstiefenklassen zu unterscheiden [10]:

- Informationen zum Prozess (was)
- Informationen zur Geometrie (wo)
- Informationen zur Operation (womit)
- Informationen zur manipulativen Methode (wie)

Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht jedes Medium geeignet ist, jede Informationstiefe abzubilden. Bei animierten Arbeitsanleitungen sind im Wesentlichen zwei Formate zu unterscheiden: (1) Videos, wie der Utility Film, werden im direkten Arbeitsumfeld gefilmt und erfordern vom Werker wenig Abstraktionsfähigkeit, da das Arbeitsumfeld und die tatsächliche Handhabung eines jeden Montageschritts mitaufgenommen werden. Alle Informationstiefenklassen werden hier mit einem Medium bedient. Die Erstellung erfordert jedoch einen hohen Aufwand und bei Produkt-, Anlagen- oder Prozessänderung sind die Arbeitsanleitungen neu zu produzieren. 3D-Animationen, welche beispielsweise aus CAD-Konstruktionsdaten des zu montierenden Produkts ableitbar sind, haben hingegen einen geringeren Erstellungsaufwand. Konstruktive und prozessuale Änderungen lassen sich aufgrund der Datendurchgängigkeit schnell durchführen [64]. Untersuchungen in der Industrie zeigen allerdings, dass in typischen Montageprozessen nur rund die Hälfte aller Einzelvorgänge tatsächliche Fügevorgänge sind. Reinigungs-, Prüf-, Schmier- oder Handhabungsvorgänge müssen in diesen Animationen in aller Regel separat über die Verwendung von Texten, Symbolen, Bildern visualisiert werden [78].

- Taktsynchronität: Ein hoher Mengendurchsatz oder eine Einhaltung hoher Qualitätsstandards erfordern vom DAS eine Unterstützung des Werkers ohne zusätzlichen Handlingaufwand synchron zu dessen Tätigkeitsausübung. Der Zergliederung des Gesamtmontageprozesses in einzelne Vorgänge entsprechend sind adäquate Informationen und Arbeitsanleitungen in einzelne Sequenzen zu zerlegen und synchron zum Montagefortschritt anzuzeigen beziehungsweise aufrufbar.

Der dargestellte Planungsumfang und die technische Komplexität DAS verdeutlichen die Notwendigkeit der Planung und Evaluierung DAS. Zur Planung und Evaluierung DAS sind in Bezug auf das zu definierende Design und die zu definierende Konfiguration des Systems vier grundlegende Anforderungen zu berücksichtigen, welche von HOLLNAGL (1987) beschrieben werden [30]. Nach HOLLNAGL (1987) sind zunächst

Rückschlüsse auf die Anforderung zu ziehen, welche Informationen einer Arbeitsaufgabe dem Werker zur Verfügung gestellt werden müssen (Fokus: WHAT). Des Weiteren ist die Anforderung zu klären, auf welche Art und Weise die Information dem Werker (Fokus: HOW) – und schließlich, wann die Information dem Werker (Fokus: WHEN) zur Verfügung zu stellen ist. Anschließend gilt es, spezifische Anforderungen zur individuellen Anpassung des Systems an individuelle Bedürfnisse der Werker festzulegen. Der Einfluss des DAS auf Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Werkern und Montagesystemen wird durch die, dem DAS zu Grunde gelegte technische Ausgestaltung bestimmt, womit verschiedene Investitionen in entsprechende Soft- und Hardwarekomponenten verbunden sind. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist dabei die Vorteilhaftigkeit eines DAS sicherzustellen.

Konzepte, Ansätze und grundlegende Modelle zur Planung und Evaluierung DAS finden sich dabei vor allem in wissenschaftlichen Diskursen der kognitiven Fabrikplanung und -gestaltung. Dabei wird zur Bestimmung von digitaler Assistenz häufig auf multidimensionale Berechnungsmodelle zur Quantifizierung von Komplexitätsgraden zurückgegriffen. Dabei variiert die Schwerpunktsetzung der Faktoren zur Bestimmung der Komplexitätsgrade. Bei ZAEH ET AL. (2008) wird zum Beispiel angeführt [80], dass die aus einer Tätigkeitsaufgabe resultierende Belastung für den Werker von drei wesentlichen Beanspruchungsfaktoren beeinflusst wird:

- Physischer Beanspruchungsfaktor
- Kognitiver Beanspruchungsfaktor
- Wissensbasierter Beanspruchungsfaktor

Der physische Beanspruchungsfaktor repräsentiert nach ZAEH ET AL. (2008) die im Hinblick auf eine bestimmte Tätigkeit determinierte Ausführungszeit, basierend auf den mechanischen und geometrischen Eigenschaften einer Fügeaufgabe und der Systematik eines ausgewählten Systems vorbestimmter Zeiten, der Methode Methods-Time-Measurement (MTM) folgend. Abhängig vom mentalen Verarbeitungsaufwand fasst der kognitive Beanspruchungsfaktor die kognitiven Elemente der Wahrnehmung, der Auswahl und der Verarbeitung einer Arbeitsaufgabe zusammen. Der wissensbasierte Beanspruchungsfaktor beruht auf mittel- und langfristigem Wissen der Belegschaft oder einzelner Werker über das Produkt und den Montageprozess und adressiert Bekanntheit und Ähnlichkeit. Der Faktor fasst die individuellen Gleichheiten beziehungsweise Ähnlichkeiten einer Arbeitsaufgabe und der Produktbedingungen zusammen. Die von diesen Beanspruchungsfaktoren determinierte Komplexität einer Arbeitsaufgabe wird durch ZAEH ET AL. (2008) als dreidimensionaler Vektor dargestellt [80]. WIESBECK (2014) nutzt dieses Modell zur Entwicklung einer graphenbasierten

Strukturbeschreibung von Arbeitsanweisungen [10]. Es wird veranschaulicht, wie eine situationsorientierte Werkerführung, die an die Bedürfnisse der Werker und an die produktionstechnische Umwelt angepasst werden kann, realisierbar ist. Die entwickelte Struktur garantiert dabei, dass der Werker durch Anweisungsdruck weder überlastet noch durch einen zu hohen Detaillierungsgrad der Informationen in der Ausführung seiner Tätigkeit behindert wird. Eine technische und wirtschaftliche Betrachtung der situationsorientierten Werkerführung wird in dem Modell von WIESBECK (2014) nicht berücksichtigt und erfolgt retrospektiv, innerhalb eines Mock-Ups [10].

Zur Erörterung der Frage, welchen Einfluss die digitale beziehungsweise kognitive Assistenz auf die Leistungsfähigkeit eines Werkers hat und auf die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Montagesystems hat, bieten CLAEYS ET AL. (2015) ein grundlegendes Regelwerk an (vgl. Abbildung 10), das auf der Betrachtung von Produkt-, Arbeitsplatzkomplexität und auf den Bedürfnissen von Werkern aufbaut. Während sich Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität vor allem auf die extrinsische Belastungssituation eines Werkers auswirken, wird die Leistungsfähigkeit eines Werkers in der Montage und damit die Wirtschaftlichkeit des Arbeitssystems auch von intrinsischen Faktoren determiniert [24]. Dabei sind drei Faktoren zu nennen: Werkereigenschaften, wie Alter, Körpergröße und physische Eigenschaften, Erfahrungsfaktoren, wie Wissen über die Arbeitstätigkeit und konditionelle Faktoren. Der Bedarf DAS wird von beiden Perspektiven adressiert und ist sowohl in Bezug auf die Systemkomplexität, als auch auf die spezifischen Werkeranforderungen zu konzipieren [24].

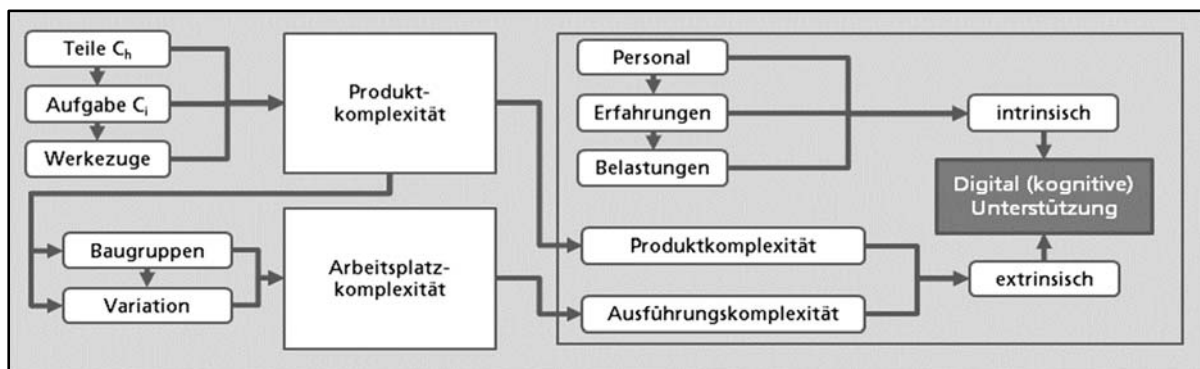


Abbildung 10: Regelwerk zur Bestimmung von digitalem (kognitivem) Unterstützungsbedarf [24]

Den Einfluss von extrinsischen und intrinsischen Faktoren auf die Mitarbeiterproduktivität δ , auf die Prozessqualität Q und auf den resultierenden Gesamtdurchsatz (Output) eines Arbeitssystems TH , beschrieben durch das Verhältnis zwischen Q und der dafür benötigten Zeit CT , zeigen ABAD ET AL. (2011) in einem schematischen Modell auf, welches in Abbildung 11 dargestellt ist [81].

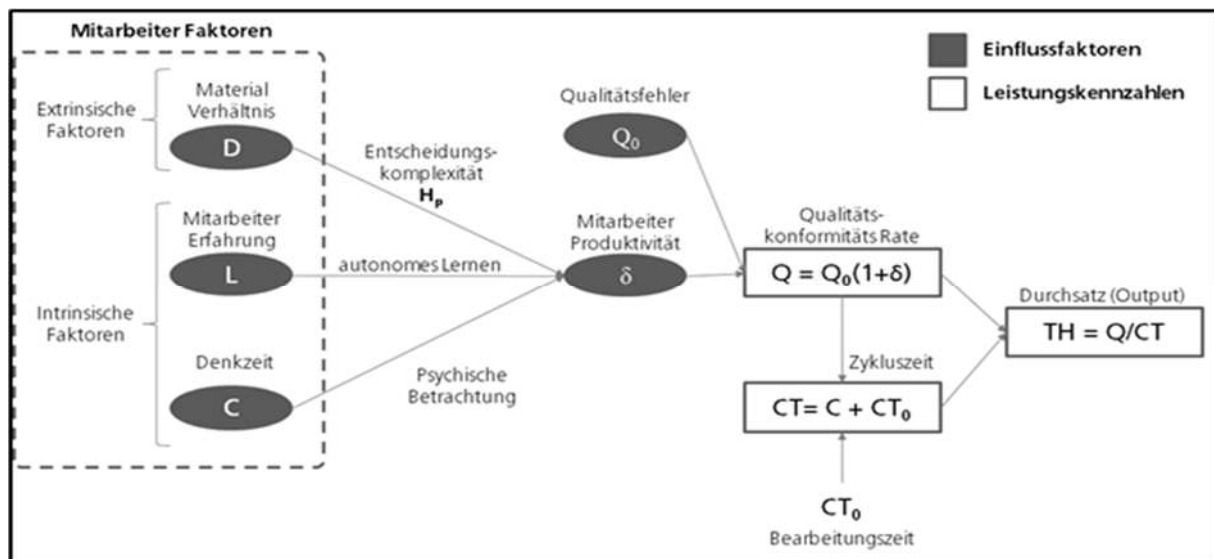


Abbildung 11: Werkereinfluss auf Prozessqualität und Durchsatz [81]

Die beschriebenen Modelle und Ansätze bauen auf grundlegenden Architekturen zur Identifikation von allgemeinem kognitivem Assistenzbedarf auf. Dabei ist festzustellen, dass die Identifikation des Bedarfs nach kognitiver Assistenz erst nach den wesentlichen Planungsschritten des Arbeitssystems erfolgt. Die dargestellten Funktionen und Komponenten moderner DAS werden in Bezug auf ihren Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätsbeitrag von Werker und Arbeitssystem nicht ausreichend betrachtet. Eine wirtschaftliche Bestimmung des DAS-Einsatzes erfolgt retrospektiv in einer Mock-Up Phase. Der hohe Abstraktionsgrad der Modelle und Ansätze ermöglicht eine integrative und für die Arbeitsvorbereitung operative Anwendung zur Bedarfsanalyse, Planung und Evaluierung eines DAS unzureichend. Operativ anwendbare Vorgehensmodelle und -methoden zur Planung DAS finden sich bei HINRICHSEN ET AL. (2016), REINHRARD (2017) und bei MERKEL ET AL. (2019) [21], [29], [82].

HINRICHSEN ET AL. (2016) zeigen eine grundlegende und beschreibende Morphologie von Assistenzsystemen in der manuellen Montage auf und verdeutlichen ein grundlegendes Konzept zum Vergleich unterschiedlicher Ausprägungen von Systemen in einer Montage [29] unter Berücksichtigung eines Entwurfsprozesses von Assistenzsystemen nach GEISER ET AL. (1997), indem Einflüsse von Arbeitsaufgabe, Benutzer, Umgebungseinflüssen und Interaktion zur Identifikation eines Assistenzsystems zu berücksichtigen sind [27]. Wie und auf welche Weise ein kritischer Pfad durch die Morphologie entlang des Modells von GEISER ET AL. (1997) bestimmbar ist, wird nicht aufgezeigt [27]. Die dargestellte Morphologie ist jedoch gut geeignet, bestehende Formen von Assistenzsystemen einzuordnen und grundlegend vergleichbar zu ma-

chen. Eine weitere Morphologie, welche zum Vergleich von Assistenzsystemen geeignet ist, findet sich bei SCHLUND ET AL. (2018) und bei KILAPPER ET AL. (2019) wieder [83], [84].

Art der Unterstützung	Physisch		Kognitiv		Organisatorisch		Kommunikativ	
Art der Delegation	Im Einzelfall			Routinemäßige Nutzung			Selbstorganisation	
Eingriffsart	Informierend		Warnend		Assistierend		Teilautonom	Vollautonom
Automatisierungsstufe	Handlungsalternativen	Auswahl einschränkung	Vorschlag	Ausführung Bestätigung	Ausführung bei Vetorecht	Ausführung Info	Info nur nach Anfrage	Autonome Entscheidung
Arbeitsteilung	Seriell			Parallel			Parallelredundant	
Anwendungsgebiet	Fertigung, Montage	Logistik		PPS, AV		Qualität	Instandhaltung, Service	Sonstige
Informations-eingabe	Manuell		Verbal		Gestikulär		Bewegungsarten	Sonstige
Eingabeeinheit	Haptisch/Taktil		Auditiv		Kinästhetisch		Optisch	Sonstige (bspw. Bionisch)
Informations-ausgabe	Optisch		Akustisch		Haptisch		Sonstige	
Ausgabeeinheit	Visuell ortsfest	Visuell mobil	Auditiv ortsfest	Auditiv mobil	Haptisch		Sonstige	

Abbildung 12: Morphologie für Assistenzsysteme [83]

Zur Beantwortung der Frage, welche Möglichkeiten zur Bestimmung der technischen Gestaltung bestehen, wird in der wissenschaftlichen Literatur auf HOLLNAGL (1987) verwiesen [30]. Dieser macht deutlich, dass zur Bestimmung der technischen Gestaltung von Assistenzsystemen technische und organisatorische Anforderungen aus drei Perspektiven zu definieren sind. Hierbei sind als erster Schritt Anforderungen zu identifizieren, welche Informationen einem Werker repräsentiert beziehungsweise zur Verfügung zu stellen sind (Fokus: WHAT). Darauf aufbauend sind Anforderungen zu definieren, wie und womit die entsprechenden Informationen dem Werker zur Verfügung zu stellen sind (Fokus: HOW) und abschließend, zu welchem Zeitpunkt (Fokus: WHEN) [30]. REINHRARD (2017) greift HOLLNAGL (1987) in Ergänzung zu grundlegenden Informationssystemanforderungen nach KRECMAR (2015) auf, definiert drei Gestaltungsfelder und führt Gestaltungsparameter an [21]. Den Gestaltungsfeldern und Gestaltungsparametern ordnet REINHRAT (2017) grundlegende technische und organisatorische Ausprägungen in Form einer Morphologie zu.

Design und Konfiguration eines DAS erfolgen qualitativ. Wie Abbildung 12 verdeutlicht, finden auch in dieser Morphologie Komponenten DAS keine Erwähnung. Darüber hinaus wird der aufgezeigte Entwurfsprozess von Assistenzsystemen nach GEISER ET

AL. (1997) [27] unter Berücksichtigung von Einflüssen wie Arbeitsaufgabe, Benutzer, Umgebungseinflüsse und Interaktion zur Identifikation eines Assistenzsystems nicht berücksichtigt. Möglichkeiten zur Beschreibung von Einflüssen von Arbeitsaufgabe, Benutzer, Umgebungseinflüssen und Interaktion auf ein DAS werden jedoch grundlegend bei LUŠIĆ ET AL. (2016) beschrieben [32]. Hierzu ordnen LUŠIĆ ET AL. (2016) unterschiedliche Beschreibungskriterien DAS grundlegenden Systemausprägungen DAS zu. Auf diese Weise werden DAS nach Mobilitätsgrad (Degree of Mobility), kognitive Werkerbelastung (Cognitive Work Load), Flexibilitätsgrad (Degree of Flexibility), Informationsquellen (Source of Worker Information), Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (Time of Information Provision), Informationszugang (Access to Worker Information), reale versus virtuelle Informationsdarstellung (Real versus Virtual Information) und Möglichkeit der Dialogführung (Ability to Dialog) eingeteilt. Je nach Ausprägungsform der aufgezeigten Beschreibungskriterien werden verschiedene Assistenzsystemmöglichkeiten zugeordnet [32].

Wie Tabelle 2 verdeutlicht, wird bei LUŠIĆ ET AL. (2016) keine ganzheitliche Morphologie DAS angesprochen, sondern lediglich auf unterschiedliche Systemausprägungen hingewiesen [32]. Auf welche Art und Weise die angeführten Beschreibungskriterien mit einzelnen Komponenten der Systeme korrelieren, wird nicht aufgezeigt. Einzelne Komponenten zur Informationsdarstellung und Informationsrepräsentation sowie unterschiedliche Teilfunktionen DAS werden adressiert, ohne das Gesamtsystem DAS zu betrachten. Ebenso wenig werden quantitative Aussagen zu möglichen Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten sowie zu Investitionserfordernisse gemacht.

Tabelle 2: Beschreibungskriterien, Möglichkeiten und Restriktionen DAS [32]

		Monitor	Augmented Reality	Augmented Virtuality	Virtual Reality	Pick-by-Light	Pick-by-Shutter	Pick-by-Voice
Grad der Mobilität	Stationär							
	Mobil							
Kognitive Belastung des Werkers	Statisch							
	Dynamisch							
Flexibilitätsgrad	Deterministisch							
	Adaptiv							
Informationsquellen	Lokal							
	Web-basiert							
Zeitpunkt der Informationsbereitstellung	Synchron							
	Statisch							
Informationszugang	Zentral							
	Dezentral							
Reale versus virtuelle Informationsdarstellung	Real							
	Virtuell							
Möglichkeit der Dialogführung des DAS	Ja							
	Nein							

MERKEL ET AL. (2019) beschreiben eine grundlegende Vorgehensweise zur Identifikation eines DAS. Hierzu ist ein Modell entwickelt worden, welches typische Systeme und Funktionen DAS beschreibt und ein Informationsflussmodell DAS erstellt. Durch Verknüpfung dieser Modelle wird aufgezeigt, dass unterschiedliche DAS generierbar und in Bezug auf ihre Investitionserfordernisse bewertbar sind [82]. Die Vorgehensweise zur Identifikation des entsprechenden DAS erfolgt dadurch, dass zunächst die Bedürfnisse der digitalen Assistenz qualitativ identifiziert und bestimmten Assistenzsystemfunktionen zugeordnet werden. Auf diese Weise erfolgt eine Vorselektion von Komponenten DAS, welche im Hinblick auf ein funktionierendes DAS bewertet werden. Aus alternativen DAS wird das investitionsvorteilhafteste System ausgewählt. Das Vorgehensmodell von MERKEL ET AL. (2019) spricht dabei grundlegende Effekte DAS an, es quantifiziert diese Effekte jedoch nicht. Auf diese Weise ermöglicht das Vorgehensmodell keine quantitative Return-on-Investment-Betrachtung. Darüber hinaus werden keine spezifischen Merkmale von Werkern oder Montageteams berücksichtigt. Das Modell von MERKEL ET AL. (2019) folgt dem Vorgehensmodell von HOLD und RANZ (2015) zur Bewertung und Selektion DAS [74].

3.4 Forschungsbedarf

Im Folgenden wird eine kritische Reflexion der gewonnenen Erkenntnisse zur durchgängige Berücksichtigung des MTO-Konzepts durchgeführt. Hierzu werden die aufgezeigten Ansätze nach CLAEYES ET AL. (2015), ZAEH & WIESBECK (2008), HOLLNAGEL (1987), LUŠIĆ ET AL. (2016), HINRICHSSEN (2016), REINHARD (2017) und MERKEL ET AL. (2019) auf Berücksichtigung der Arbeitsaufgabe, des Menschen, der Technik, der Organisation sowie der praxisgerechten Anwendbarkeit analysiert [19], [22], [27], [28], [30], [65], [67]. Folgende Einzelkriterien werden betrachtet:

Fokus Arbeitsaufgabe:

- Berücksichtigung von spezifischen Arbeitsaufgaben
- Berücksichtigung gleichbleibender Arbeitsaufgaben
- Berücksichtigung dynamisch wechselnder Arbeitsaufgaben

Fokus Mensch:

- Berücksichtigung menschlicher Eigenschaften
- Berücksichtigung menschlicher Erfahrungen
- Berücksichtigung menschlicher, subjektiver Wahrnehmungen

Fokus Technik:

- Berücksichtigung fix definierter DAS
- Berücksichtigung einzelner Komponenten DAS
- Berücksichtigung von Interaktionen DAS mit weiteren Systemen

Fokus Organisation:

- Berücksichtigung des Arbeitssystems als statisches oder dynamisches Artefakt
- Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitsaspekten (hier: Kosten-/Nutzenverhältnis)
- Berücksichtigung einer gleichbleibenden oder dynamischen Auftragsdurchführung

Fokus: Anwendbarkeit als Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung

- Anwendbarkeit in der Praxis
- Quantifizierter Soll-/Ist-Vergleich in frühen Phasen des PEPs

Die folgenden Tabellen (Tabelle 3,

Tabelle 4) verdeutlichen, dass der gegenwärtige Stand der Forschung zur Planung und Evaluierung DAS keinen quantitativen Soll-/Ist-Vergleich zum Einsatz DAS adressiert. Einige der Ansatz sind in der Praxis zur grundsätzlichen Planung und Evaluierung zwar geeignet und ermöglichen grundsätzliche Aussagen zur Wirtschaftlichkeit zum Einsatz eines DAS in der Montage, doch werden diesbezüglich vor allem Investitionen in festgelegte DAS betrachtet, ohne auf mögliche, quantifizierte monetäre Rückflüsse einzugehen. Quantifizierte Erkenntnisse über grundlegende Einflüsse auf Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Werkern und Arbeitssystemen durch DAS finden sich in einer Vielzahl von Studien wieder, in denen Einflüsse von unterschiedlichen Teilkomponenten DAS quantitativ untersucht worden sind – hier jedoch auf die Ausführung einer immer gleichen manuellen Tätigkeit. Ferner fällt auf, dass im Falle einer quantifizierten Soll-/Ist-Betrachtung von DAS, diese stets in einer Mock-Up Phase (retrospektiv) durchgeführt wird [33].

Tabelle 3: Erkenntnisse zum Stand der Forschung zur Planung und Evaluierung DAS (x = zutreffend), Arbeitsaufgabe – Mensch – Technik (eigene Darstellung)

	Arbeitsaufgabe			Mensch			Technik		
	Berücksichtigung von Arbeitsaufgaben	Berücksichtigung gleichbleibender Arbeitsaufgaben	Berücksichtigung dynamisch wechselnder Arbeitsaufgaben	Berücksichtigung menschlicher Eigenschaften	Berücksichtigung menschlicher Erfahrungen	Berücksichtigung menschlich subjektiver Wahrnehmungen	Berücksichtigung komplettes DAS	Berücksichtigung einzelner Komponenten DAS	Berücksichtigung von Interaktionen DAS mit weiteren Systemen
CLAEYES ET AL.	x	x		x	x	x	x		
ZAEH & WIESBECK	x	x		x	x	x	x		
HOLLNAGEL	x	x					x		
LUŠIĆ ET AL.	x	x					x		
HINRICHSEN	x	x					x	x	
REINHARD	x	x		x			x	x	
MERKEL ET AL.	x	x		x			x		

Tabelle 4: Erkenntnisse zum Stand der Forschung zur Planung und Evaluierung DAS (x = zutreffend), Organisation – operative Anwendbarkeit (eigene Darstellung)

	Organisation					Operative Anwendbarkeit zur Planung und Evaluierung	
	Arbeitssystem		Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kosten/Nutzen)	Auftragsdurchführung		Anwendbar in der Praxis	Ermöglichung eines quantifizierten Soll-/Ist-Vergleichs in frühen Phasen der Produktentwicklung
	statisch	dynamisch veränderbar		statisch	dynamisch veränderbar		
CLAEYES ET AL.	x	x					
ZAEH & WIESBECK						(x)	
HOLLNAGEL						(x)	
LUŠIĆ ET AL.							
HINRICHSEN			x			x	
REINHARD	x	x	x	x	x	x	
MERKEL ET AL.	x	x	x	x	x	x	

Die Beantwortung der Fragen, aus welchen konkreten Komponenten DAS aufzubauen sind, um einen effizienten Beitrag zur Gewährleistung oder auch zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Werkern und Arbeitssystem in der Mixed-Model Montage zu erzielen, erfolgt nicht. Der hohe Abstraktionsgrad der in Kapitel 3.3 aufgezeigten Modelle und Ansätze zur Planung und Evaluierung DAS ermöglicht eine integrative und für die Arbeitsvorbereitung operativ anwendbare Vorgehensweise zur Planung und Evaluierung DAS nur unzureichend.

Ein durchgängiger Ansatz, eine durchgängige Methode beziehungsweise noch ein durchgängiges Vorgehensmodell für eine quantifizierte Entscheidungsunterstützung beziehungsweise auf eine effektive und effiziente Planung und Evaluierung DAS, welche individuelle menschliche Anforderungen (Leistungsangebot) für unterschiedliche zu montierende Produkte und Produktvarianten in der Mixed-Model-Montage (Leistungsnachfrage) berücksichtigt, wird nicht adressiert. Ein Vorgehensmodell zur prospektiven Ermittlung eines quantifizierten Soll-/Ist-Vergleichs zur Identifikation und Auswahl eines DAS in frühen Phasen des Produktionsentstehungsprozesses unter Berücksichtigung einzelner Komponenten DAS konnte nicht identifiziert werden. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass der aktuelle Stand der Forschung zur Planung und Evaluierung DAS zwar das MTO-Konzept adressiert, hierbei jedoch nicht ins Detail geht, sodass eine quantifizierbare Investitionsentscheidungsunterstützung nicht ermöglicht wird. Hierzu sind zwei Gründe anzuführen: Erstens sind nur wenige Erkenntnisse über den Einsatz und die einzelnen Komponenten DAS im Hinblick auf in Wechselwirkung stehende menschliche, technische und organisatorische Anforderungen [21] bekannt. Ein

weiterer Grund ist die Schwäche der Nicht-Beachtung von IKT in Methoden und Werkzeugen, die in frühen Phasen der Produktentwicklung bei der Planung von Montagesystemen zum Einsatz kommen [22]. Diesbezüglich sind die Vorgehensmodelle der Montageplanung nach BULLINGER (1986), KONOLD und REGER (2003) und LOTTER und WIENDAHL (2012) in Anlehnung an WIESBECK (2014) unter Beachtung DAS analysiert worden [10], [16], [41], [79], vgl. Abbildung 51 im Anhang.

Es wird verdeutlicht, dass ein Forschungsbedarf sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praxisorientierter Sicht zur Entwicklung eines anwendungsgerechten und ganzheitlichen Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS besteht, welches es ermöglicht, einen quantifizierten Soll-/Ist-Vergleich im Hinblick auf die Findung einer Investitionsentscheidung in DAS unter konsequenter Berücksichtigung des MTO-Konzeptes zu treffen und die Arbeitsaufgabe als verknüpfendes Glied der sozialen und technischen Teilsysteme eines Arbeitssystems stellt sowie eine Verbindung mit dem Menschen, seinen individuellen Merkmalen und Eigenschaften und den organisatorischen Strukturen und Zielsetzungen eines Industrieunternehmens schafft.

4 Problemstellung, Zielsetzung und Anforderung

Dieses Kapitel stellt auf Grundlage des aufgezeigten Stands der Forschung und dem daraus identifizierten Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 3) zunächst die spezifische Problemstellung dieser Arbeit dar (vgl. Kapitel 4.1). Darauf aufbauend werden die spezifische Zielsetzung und die zu bearbeitende Forschungsfrage dieser Arbeit (vgl. Kapitel 4.2) sowie die Anforderungen zur Erreichung der Zielsetzung und zur Beantwortung der Forschungsfrage aufgezeigt (vgl. Kapitel 4.3).

4.1 Problemstellung

Der aufgezeigte Forschungsbedarf verdeutlicht, dass ein durchgängiges Vorgehensmodell in Bezug auf eine quantifizierte Planung und Evaluierung DAS, welche individuelle menschliche Anforderungen (Leistungsangebot) in der Mixed-Model-Montage (Leistungsnachfrage) berücksichtigt, nicht nachzuweisen ist und einzelne Komponenten DAS nicht ausreichend in vorliegenden Planungs- und Evaluierungsansätzen DAS berücksichtigt werden. Dies Erkenntnis wird aus Sicht der Praxis, durch in der von WILLEKE und KASSELMANN (2016) durchgeführten Befragung, bestätigt [13].

Im Rahmen einer Befragung hat das International Performance Research Institute (IPRI) und das Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) in Kooperation mit der deutschen Industrie- und Handelskammer (IHK) und dem Verband der Metallindustriellen Niedersachsens eine Befragung von Industrieunternehmen zur Identifikation von Hemmnissen und Herausforderungen bei der Einführung interaktiver Assistenzsysteme in Produktion und Logistik durchgeführt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es der Industrie an Wissen über Einführung und Markttransparenz DAS fehlt. Zudem gibt es Befürchtungen im Hinblick auf anfallende Kosten ohne Kenntnis der zu erzielenden Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte. Trotz der aufgezeigten Hemmnisse in Industrieunternehmen für die Einführung von Assistenzsystemen erwarten die von WILLEKE und KASSELMANN (2016) befragten Industrieunternehmen einen signifikanten Mehrwert durch den Einsatz DAS. Dieser Mehrwert wird mit der Reduktion von Fehlern und Ausführungszeiten, mit einer besseren Dokumentation und mit einem besseren Informationsangebot auf dem Shopfloor [13] in Verbindung gebracht. Die von WILLEKE und KASSELMANN (2016) dargestellten Aussagen folgen ergänzend zwölf Anwendungspartner im Rahmen des österreichischen Leitprojektes MMAssist II (FFG: Nr. 858623).

Auf der Grundlage des aufgezeigten Stands der Forschung und der vorliegenden Erkenntnissen der Industrieunternehmen lässt sich folgende Problemstellung definieren:

„Es existiert keine durchgängige Methode und kein durchgängiges Vorgehensmodell, das eine effiziente und effektive Planung und Evaluierung DAS unter Berücksichtigung vielfältiger Tätigkeiten, welche durch individuelle Mitarbeiter in der Montage durchzuführen sind, und das auf die technische Komplexität und Diversität DAS im Hinblick auf eine quantifizierte Entscheidungsunterstützung zur Einführung eines DAS, eingeht.“

Unter „effektive und effiziente Planung und Evaluierung DAS“ wird hierbei ein anwendungsorientierter Ansatz verstanden, welcher vor allem im Hinblick auf die Planung DAS auf Informationsdaten aus frühen Phasen der Produktentwicklung zurückgreift. Die „quantitative Entscheidungsunterstützung“ ist in der aufgezeigten Problemstellung als eine monetär zu bewertende Gegenüberstellung von Anschaffungskosten (Investitionen) und betriebswirtschaftlichen, beziehungsweise monetär zu bewerteten Produktivitätseffekten bezugnehmend auf einen Vergleich einer Ist- und Soll-Situation zu verstehen. Dabei bezieht sich die Ist-Situation auf ein zu planendes oder auf ein zu evaluierendes DAS, während sich die Soll-Situation auf ein definiertes DAS bezieht, welche aus menschlicher und betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist. Das DAS setzt sich dabei aus einzelnen Teilkomponenten zusammen (vgl. beispielsweise Abbildung 1) und muss einen funktionsfähigen Einsatz garantieren.

4.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Ogleich ein positiver Einfluss auf kognitive Belastung von Werkern durch DAS in der wissenschaftlichen Literatur belegt ist, liefern bestehende Modelle, Methoden und Werkzeuge im Zuge der Findung einer Investitionsentscheidungsgrundlage zur Einführung DAS in der Montage aktuell keine quantitativen Soll-/Ist-Vergleichsaussagen (vgl. Kapitel 3.3). Quantitative Bewertungsmethoden oder Modelle zur prospektiven Ermittlung von DAS Bedürfnissen unter Berücksichtigung von werkerindividuellen Eigenschaften sowie Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten von Werker und Arbeitssystem liegen nicht vor. Die zunehmende technische Komplexität und Funktionalität DAS erschwert dabei das Treffen quantitativer Investitionsentscheidungen, bei denen Nutzeneffekte und Investitionserfordernisse gegenübergestellt werden. Vor diesem Hintergrund adressiert diese Arbeit folgende Zielsetzung:

- **Zielsetzung:** *Entwicklung eines anwendungsgerechten Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage, das in frühe Phasen der Montageplanung integrierbar ist und eine Investitionsentscheidung durch einen quantitativen Soll-/Ist-Vergleich ermöglicht.*

Die Zielsetzung beinhaltet dabei folgende Subzielsetzungen, welche im Weiteren mit dieser Arbeit verbunden sind:

- **Subzielsetzung 1:** *Identifikation zentraler Beschreibungsparameter, um einen menschenorientierten und einen betriebswirtschaftlich sinnvollen beziehungsweise produktivitätsstiftenden Einsatz DAS in der Montage zu bestimmen.*
- **Subzielsetzung 2:** *Entwicklung einer mathematischen Formulierung zur Bestimmung von Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten DAS auf Komponentenbasis unter Verwendung von Informationsdaten aus frühen Phasen der Produktentwicklung.*
- **Subzielsetzung 3:** *Entwicklung eines Vorgehensmodells, um quantitativen Aussagen zur Entscheidungsunterstützung einer DAS-Einführung und einer DAS-Evaluierung in der Montage zu treffen.*

Zur Erreichung der Zielsetzung und der Subzielsetzungen steht folgende Forschungsfrage im Fokus dieser Arbeit:

- **Forschungsfrage:** *Ist eine durchgängige Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in Bezug auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseinflüsse von Werkern und Montagearbeitssystemen im Spannungsfeld des MTO-Konzepts möglich?*

Die Arbeit adressiert zusammenfassend, nach HEVNER ET AL. (2010), ein Artefakt [38], welches zum einen in die klassischen Phasen der Montageplanung und -evaluierung (vgl. im Anhang Abbildung 51) integrierbar ist und eine praxisgerechte Anwendung auf Grundlage vorhandener Methoden und Erkenntnisse innerhalb des MTO-Konzeptes ermöglicht.

4.3 Anforderungen an das Vorgehensmodell

Im Sinne der nachhaltigen Erhaltung und Steigerung von Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Menschen und Arbeitssystemen durch den Einsatz DAS in der Montage gilt es, das Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS unter Berücksichtigung des MTO-Konzeptes zu entwickeln. Dabei ist vor dem Hintergrund der Zielsetzung und Forschungsfrage dieser Arbeit ein analytisches Bewertungs- und Selektionsmodell zu entwickeln, welches auf unterschiedliche Komponenten DAS ausgerichtet ist und auf Basis von Informationen aus frühen Phasen der Produktentwicklung sowie aus geplanten Tätigkeiten innerhalb einer Mixed-Model-Montage und unter Berücksichtigung individueller Mitarbeiterprofile quantifizierte Aussagen zur Wirtschaftlichkeit einer Implementierung und Inbetriebnahme DAS liefert. Durch Berücksichtigung des

MTO-Konzepts in der Entwicklung des Vorgehensmodells ist es möglich, quantifizierbare Investitionsszenarien aufzuzeigen und eine menschengerechte und gleichzeitig betriebswirtschaftlich sinnvolle Investitionsentscheidungsgrundlage aufzuzeigen. Dabei ist eine praxisgerechte Anwendung des Vorgehensmodells zu gewährleisten, welche ohne großen Aufwand in Phasen der Montageplanung von Industrieunternehmen integrierbar ist. Diesem Ansatz folgt ergänzend, dass ausschließlich industrieeerprobte Methoden innerhalb des Vorgehensmodells anzuwenden sind. Dem MTO-Konzept folgend wird in Tabelle 5 eine zusammenfassende Darstellung der grundlegenden Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell gegeben.

Tabelle 5: Anforderungen an das Vorgehensmodell (eigene Darstellung)

1	Verwendung der Arbeitsaufgabe als verknüpfendes Glied der sozialen und technischen Systeme sowie zur Verbindung des Menschen und der organisatorischen Strukturen	
2	Mensch	Beachtung individueller Mitarbeiterprofile
3	Technik	Beachtung von Informations- und Kommunikationstechnologien, wie DAS und damit verbundene Investitionen
4	Organisation	Beachtung von quantifizierbaren Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten

Entsprechend den in Tabelle 5 dargestellten vier Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell, gilt es, bezogen auf den Aspekt Mensch, individuelle Mitarbeiterprofile (Werkereigenschaften), bezogen auf den Aspekt Technik, einzelne Komponenten DAS und bezogen auf den Aspekt Organisation, Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte zu berücksichtigen, wobei die Verwendung der Arbeitsaufgabe als verknüpfendes Glied der sozialen und technischen Systeme sowie zur Verbindung des Menschen mit den organisatorischen Strukturen zu gewährleisten ist.

Das Output-/Input-Verhältnis von Produktivität nach BOKRANZ (2012) verdeutlicht die Einflussnahme des MTO-Konzeptes, indem Produktivität das Ergebnis der Division der Outputgröße Leistung und der Inputgrößen Beschäftigte, Betriebsmittel und Rohstoffe darstellt [85], [86]. Es verdeutlicht, dass die Divisoren Beschäftigte und Betriebsmittel in Abhängigkeit von der Arbeitsorganisation und von technischen Aspekten stehen. Ein in der Industrie vielfach verwendeter Ansatz ist das MTM-Produktivitätsmanagement [85], [86]. Das MTM-Produktivitätsmanagement folgt der Annahme, dass sich erfolgreiche Industrieunternehmen unter sonst gleichen Bedingungen kaum durch die Qualität der Ressourcen Technologie, Betriebsmittel und Rohstoffe, jedoch grundlegend durch die Qualität der Ressource Mensch (Beschäftigte) und die Wirksamkeit der

sie unterstützenden Organisation unterscheiden. Die Produktivitätsdefinition³ im klassischen Sinne ist demnach insofern Mittel zum Zweck, als dass sie kein betriebswirtschaftliches Letztziel, sondern ein Mittel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Profitabilität und Wettbewerbsfähigkeit ist [86]. Die Methode MTM stellt dabei ein System von vorbestimmten Zeiten dar und wird vielfach in frühen Phasen der Produktentwicklung zur Arbeitsvorbereitung eingesetzt [87].

Die Methode erklärt, dass die bei der Durchführung einer bestimmten Tätigkeit beanspruchte Zeit von der gewählten Arbeitsmethode abhängt. Mittels MTM ist es möglich, durch Analyse der Arbeitsmethode (des menschlichen Bewegungsablaufes bei der Ausführung einer Arbeitstätigkeit) in Bezug auf eine Ist-Situation aber auch in Bezug auf eine Soll-Situation auf die zur Durchführung einer Tätigkeit benötigte Zeit zu schließen. Das Ergebnis einer MTM-Analyse sind strukturierte Bewegungsabläufe, welche auf Grundbewegungen basieren. Jeder Grundbewegung sind Normzeiten zugeordnet, die einem einheitlichen und international anerkannten Leistungsstandard unterliegen. Die für die Ausführung der Arbeitsaufgabe benötigte Zeit wird von der Positionierung, der Greifweite sowie vom Gewicht der zu handhabenden Objekte beeinflusst. Die Verwendung von MTM stellt eine valide Basis zur Identifikation von Mängeln in manuell geprägten Ablaufprozessen dar und zielt im Sinne der Philosophie des Lean Management auf die Identifikation, Bewertung und Beseitigung von Verschwendungen ab [86], [88]. Häufig verwendete Systeme dieser Art sind unter den Bezeichnungen UAS (Universelles Analysier-System) für die Serienfertigung und MEK (MTM in der Einzel- und Kleinserienfertigung) bekannt. Aufbauend auf diesen verdichteten Verfahren existieren Tabellen mit voranalysierten Abläufen für typische Montagetätigkeiten, wie zum Beispiel „schrauben“ und „Normteile montieren“. In diesen Tabellen sind neben gewichteten Methoden für ein Verfahren auch Prozesszeiten für unbeeinflussbare Tätigkeiten der statischen Haltearbeit standardisiert enthalten. Über die bereits verdichteten Wertetabellen werden weitere Verdichtungsstufen zur Abbildung unternehmensspezifischer Prozesse gebildet, die es dem Anwender ermöglichen, vereinfacht die eigenen Abläufe zu analysieren [86]. Darüber hinaus wird die Methode MTM vielfach in der digitalen Fabrikplanung im Zuge einer prospektiven Ermittlung und Beschreibung von Montageinhalten und -tätigkeiten in frühen Phasen der Produktentstehung verwendet. Die Tatsache basiert im Wesentlichen auf den vier Grundeigenschaften der MTM-Processsprache – Modellbildungsimmanenz, Simulationsfähigkeit, Komplexitätsvariation

³ Produktivität beschreibt im Allgemeinen das Verhältnis von Output und Input eingebrachter Produktionsfaktoren [86].

und Bezugsleistungstreue [89]. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Prospektive Ermittlung von Montagearbeitsinhalten in der digitalen Fabrik“ [63], wie es gelingt, durch das Zusammenführen der Forschungsfelder Produktdatentechnologie, digitale Fabrik, Data Mining und Systeme für vorbestimmte Zeiten eine Informationsbasis zu erhalten, mit der es möglich ist, in frühen Phasen der Produktentwicklung Rückschlüsse auf eine effiziente Gestaltung und Organisation von Arbeitssystemen zu ziehen [90].

Neben den in Tabelle 5 dargestellten Anforderungen an die zu entwickelnde Vorgehensweise sind beziehend auf den im Kapitel 3.4 identifizierten Forschungsbedarf folgende Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell zu stellen:

Tabelle 6: Weitere Anforderungen an das Vorgehensmodell (eigene Darstellung)

5	Beachtung einer praxisorientierten Anwendung in frühen Phasen der Produktentwicklung beziehungsweise Integrierbarkeit in die Phasen der Montageplanung
6	Beachtung individueller Tätigkeiten innerhalb einer Mixed-Model-Montage
7	Beachtung von quantifizierbaren Zeiterfordernissen

Wird MTM in Vergleich zu den aufgezeigten sieben Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS gesetzt, so zeigt sich in Bezug auf die erste Anforderung, dass es mittels MTM ermöglicht wird, individuelle, durch einen Werker auszuführende Aufgabenstellungen in Montagesystemen auf Grundlage der MTM Arbeitsprozessbeschreibung detailliert darzustellen und zu analysieren, wodurch MTM auch die gestellte sechste Anforderung adressiert [87]. Die Tatsache der hohen Verbreitung von MTM in der Industrie [91], ihr Bezug auf das von BOKRANZ (2012) dargestellte Produktivitätsmanagement [85], [86], sowie die Tatsache, dass mittels MTM ergänzend eine Arbeitsprozessanalyse auf Basis zentraler Informationen aus frühen Phasen der Produktentwicklung im Zuge der Ermittlung von Planzeiten möglich ist, verdeutlicht, dass MTM den aufgezeigten Anforderungen vier und fünf entspricht [87]. Gegenwärtig findet jedoch weder eine Beachtung DAS noch etwaiger anderer Technologien und deren Investitionen als Gestaltungsobjekt zur Unterstützung manueller Montagetätigkeiten eine Berücksichtigung in MTM, eben so wenig wie eine explizite Beachtung von individuellen Mitarbeiterprofilen. Vor diesem Hintergrund adressiert MTM die gestellten Anforderungen zwei und drei nicht. Mittels MTM werden Ausführungszeiten manueller Montagetätigkeiten quantifiziert [87]. Auf Basis von MTM ist es möglich, manuelle Tätigkeiten zur Bedienung DAS im Hinblick auf deren Interaktionszeit zu quantifizieren. Auf diese Weise wird die gestellte Anforderung sieben durch MTM adressiert. Wie dargestellt, adressiert MTM gegenwärtig explizit noch keine Informations- und Kommunikationstechnologien wie DAS. Die Me-

thode MTM wird jedoch in der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion als Voraussetzung gesehen, eine Verbindung zwischen der digitalen Planungs- und Steuerungswelt einerseits und der physischen Ausführungswelt andererseits zu schaffen, um die Digitalisierung des Industrial Engineering voranzutreiben, wie in Bezug auf den Einsatz von Werkerführungssystemen [92]. Darüber hinaus adressiert MTM gegenwärtig ausschließlich den durchschnittlichen Leistungsgrad (Verhältnis von beeinflussbarer Istleistung zu einer Bezugsleistung aus [86]) von Mitarbeitern und beachtet keine mitarbeiterindividuellen Leistungsgrade [78]. Diese sind jedoch theoretisch MTM Prozessbausteinen zu hinterlegen. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, wie von LOLLING (2003) und JESKE (2013) adressieren diesen Nachteil der Methode MTM und zeigen Ansätze auf, individuelle Eigenschaften von Werkern (Menschen) in Zusammenhang mit der Methode MTM zu setzen [93], [33]. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass entgegen weiterer arbeitsprozessbeschreibender Methoden oder weiterer Systeme vorbestimmter Zeiten [87], durch die Methode MTM zentrale Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell adressiert werden. Die Methode MTM wird als geeignete Grundlage für die Entwicklung des Vorgehensmodells angesehen. Zusammenfassend gilt es, auf Grundlage der Methode MTM ein Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS zu entwickeln, welches menschliche, technische und organisatorische Aspekte im Hinblick auf Absicherung und Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Werkern und Arbeitssystemen beachtet. Dabei liegt der Fokus auf quantitativ zu ermittelnden Investitionen und auf quantitativ zu bewertende Ausführungszeiten, welche als zentrale Kennzahlen für Wirtschaftlichkeit und Produktivität anzusehen sind [94].

Zur Erreichung der Zielsetzung sowie zur Beantwortung der Forschungsfrage dieser Arbeit sind die drei Dimensionen Mensch, Technik und Organisation zu betrachten. Die Methode MTM wird dabei als verbindende Methode verwendet, im Sinne der Aufgabe des MTO-Konzeptes, welche die drei Aspekte miteinander verbindet. Im Zuge der Entwicklung des Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS werden zunächst in Kapitel 5.1 Komponenten DAS betrachtet. Da Zielsetzungen und Funktionen DAS (vgl. Kapitel 4.2) im Spezifischen durch einzelne Komponenten DAS determiniert sind, erfolgt eine Darstellung und Beschreibung relevanter Komponenten innerhalb einer Morphologie und eine anschließende Zusammenfassung in sogenannten Technologie-Pools. Nachdem die Komponenten DAS dargestellt und beschrieben worden sind, werden Beschreibungsparameter mit dem Ziel dargestellt und beschrieben, eine grundsätzliche soziotechnische Verbindung zwischen Technik und Mensch herzustellen. Diese Verbindung gilt es zu formulieren. Hierzu wird die Methode MTM zunächst auf Informationsgehalt geprüft, inwiefern diese Beschreibungsparameter bestimmbar

sind. Bezüglich identifizierter Informationsengpässe wird geprüft, inwiefern der MTM-Informationsgehalt ergänzbar ist, um diese Lücke zu schließen. Das Ergebnis der formulierten Beschreibungsparameter stellen sogenannte Tendenzkennzahlen dar. Diese Tendenzkennzahlen werden anschließend den Komponenten DAS zugeordnet und Einflüsse zwischen den Beschreibungsparametern, deren Tendenzkennzahlen und den Komponenten DAS verdeutlicht. Auf diese Weise repräsentiert Kapitel 5 den Schnittmengenbereich Technik-Mensch des MTO-Konzeptes. Das daran anschließende Kapitel 6 betrachtet den Menschen mit seinen individuellen Eigenschaften als Werker im Arbeitssystem der Montage. Eigenschaften des Menschen werden in diesem Kapitel in menschliche Beschreibungsparameter überführt und es erfolgt eine Analyse und Darstellung, inwiefern diese Beschreibungsparameter einen Einfluss auf organisatorische Zielsetzungen DAS haben. Da MTM mitarbeiterindividuelle Eigenschaften nicht beachtet, wird auf eine mathematische Formulierung der Beschreibungsparameter auf Grundlage der Methode MTM verzichtet, es wird jedoch auf ergänzend zu berücksichtigende Methoden verwiesen, welche eine Formulierung menschlicher Eigenschaften ermöglicht. Die Verbindung zwischen diesen Methoden und der Methode MTM wird in Kapitel 7 aus Gründen der Übersichtlichkeit dargestellt. Kapitel 7 stellt den Schnittmengenbereich des MTO-Konzeptes Mensch-Organisation (Arbeitsorganisation) dar. Kapitel 7 nimmt Bezug auf den Schnittmengenbereich Technik-Organisation (Unternehmensziel) des MTO-Konzeptes und betrachtet die Verknüpfung von Technik und Wirtschaftlichkeits- sowie Produktivitätseffekten im Hinblick auf zentrale Unternehmenszielsetzungen in der Montage. Hierzu werden Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte in Form von Beschreibungsparametern dargestellt. Anschließend erfolgt eine Formulierung dieser Beschreibungsparameter auf Grundlage der Methode MTM. Bezüglich identifizierter Informationsengpässe wird geprüft, wie die Methode MTM, um Informationsgehalt zu ergänzen ist, um mögliche Lücken zur Bestimmung zu schließen. Abschließend werden Einflüsse zwischen den Beschreibungsparametern zur Wirtschaftlichkeit beziehungsweise Produktivität DAS und relevante Komponenten DAS dargestellt. Die Erkenntnisse werden anschließend in Kapitel 8 in der Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS verbunden.



Abbildung 13: Beachtung des MTO-Konzeptes in der vorliegenden Arbeit (eigene Darstellung)

5 Technische Faktoren digitaler Assistenzsysteme

In diesem Kapitel wird eine Morphologie digitaler Assistenzsysteme entwickelt. Diese erlaubt es, einzelne Komponenten zur Bestimmung eines grundlegenden Mehrwerts in der Montage systematisch bewerten zu können.

Die einzelnen Komponenten werden

- (1) nach technischen Funktionen digitaler Assistenzsysteme (vgl. Kapitel 3.1) in *Technologie-Pools* zusammengefasst. Darauf aufbauend erfolgt eine
- (2) Identifikation von komponentenspezifischen Beschreibungsmerkmalen digitaler Assistenzsysteme (*Beschreibungsparameter*, vgl. Kapitel 5.1). Daran anschließend wird dargestellt,
- (3) wie die Methode MTM unterstützen kann, diese Beschreibungsparameter quantifiziert zu bestimmen. Hierzu wird der Informationsgehalt einer MTM-UAS Analyse betrachtet und im Falle von Informationsengpässen mit ergänzenden Informationen ergänzt (Kapitel 5.2).
- (4) Dabei wird die Ausprägung der Beschreibungsparameter in *Tendenzkennzahlen* ausgedrückt. Sie werden likert-skaliert den einzelnen Komponenten zugeordnet, wodurch jeder Komponente eine eindeutige Identifikation zu Teil wird (Kapitel 5.3).
- (5) Die Zuordnungen werden anschließend in tabellarischen Regelwerke zusammengefasst. Durch die Verknüpfung der menschlichen Arbeitsmethode (MTM-UAS) mit den Komponenten digitaler Assistenzsysteme wird dem MTO-Konzept (Schnittmenge Mensch-Technik) gefolgt.
- (6) Eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt am Ende des Kapitels (Kapitel 5.4).

Die im Rahmen dieses Kapitel entwickelte Morphologie sowie dargestellte Erkenntnisse wurden durch Anwendung auf verschiedene industrielle digitaler Assistenzsysteme - Anwendungen in der cyber-physischen Montage der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 und auf Grundlage von Expertengespräche mit Wissenschafts- und Industrievertretern im Rahmen des Forschungsprojektes MMAssist II (FFG Nr. 858623) sowie im Rahmen des Projektes der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 (FFG Nr. 852105 und FFG Nr. 852103) generiert. Abbildung 14 stellt den strukturellen Aufbau des Kapitels dar.

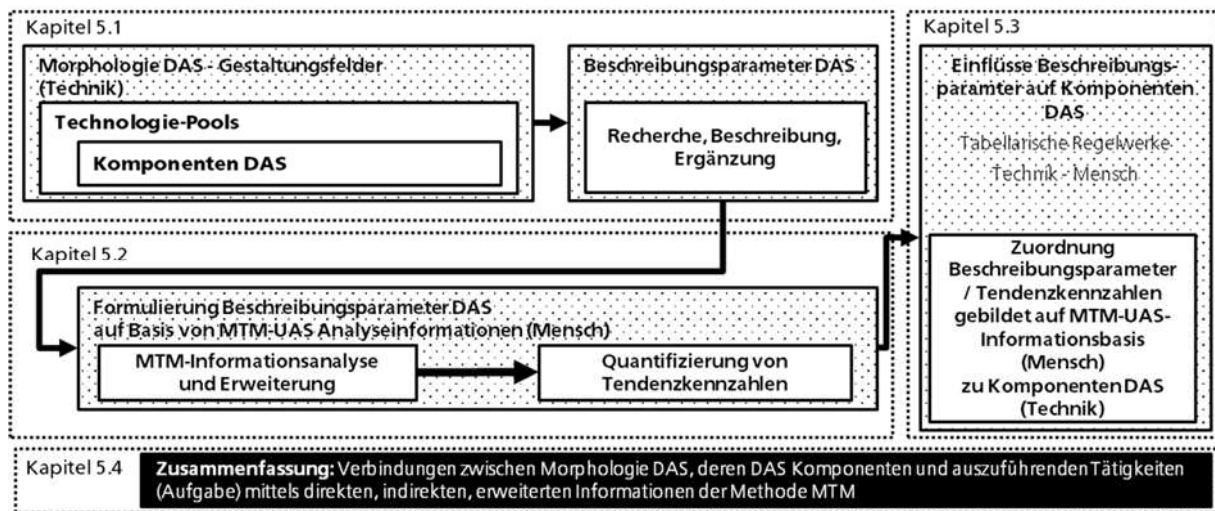


Abbildung 14: Struktureller Aufbau des Kapitels 5 (eigene Darstellung)

5.1 Beschreibungsparemter digitaler Assistenzsysteme

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Entwicklung einer Morphologie entlang der Gestaltungsfelder – *Degree, Design, Device und Data-Processing* (vgl. Kapitel 3.2) und anschließend eine Zuordnung (ausgewählter) Komponenten digitaler Assistenzsysteme innerhalb des entwickelten morphologischen Kastens⁴ (vgl. Kapitel 5.1.1). Daraus anschließend werden Beschreibungsparemter identifiziert, durch welche die einzelnen Komponenten beschreiben (zuordbar) werden.

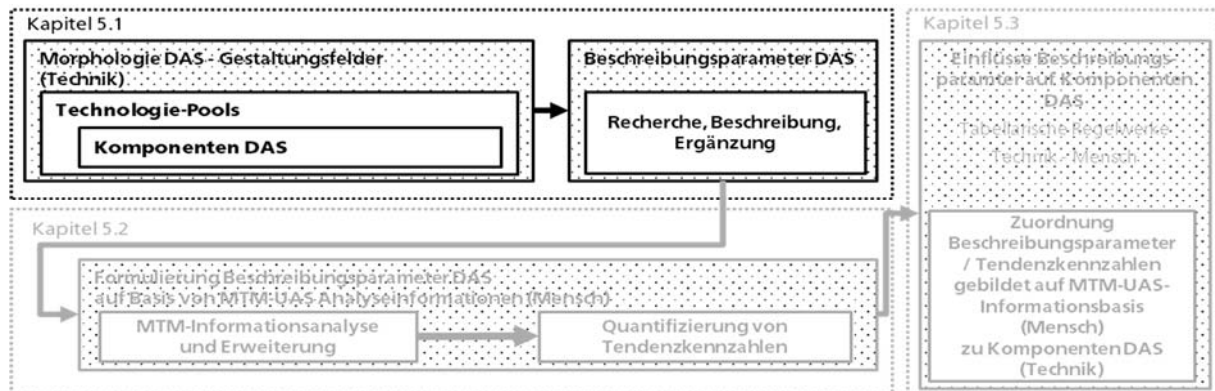


Abbildung 15: Einordnung Morphologie, Technologie-Pools und Beschreibungsparemter DAS (eigene Darstellung)

⁴ Der morphologische Kasten (Morphologie = Lehre des geordneten Denkens) ist eine kreativ-analytische Technik. Dabei wird das betrachtete Problem in möglichst viele Teilaspekte (im folgenden Gestaltungsfelder) zerlegt und mehrdimensional klassifiziert. Jeder Teilaspekt des Gesamtproblems besitzt verschiedene Ausprägungen (Gestaltungsmöglichkeiten). Für jeden Teilaspekt werden denkbare Lösungen gesucht. Diese werden in einer Matrix dargestellt und zur Entwicklung einer Gesamtlösung systematisch miteinander kombiniert. Aus der Kombination der Einzellösungen entsteht eine Vielzahl von Lösungsvarianten (kritische Pfade). Die Methode des morphologischen Kastens wird vor allem in der Konstruktionslehre und bei der Suche nach Konstruktionslösungen angewendet [96].

5.1.1 Morphologie und Technologie-Pools digitaler Assistenzsysteme

Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, wird im Gestaltungsfeld Degree grundlegend zwischen Informationstyp und Informationsmenge unterschieden. Die oben aufgezeigten Ausprägungen werden in der Morphologie entsprechend berücksichtigt.

Tabelle 7: Ausprägungen im Gestaltungsfeld Degree – Informationsgrad (eigene Darstellung)

Degree Informationsgrad (WAS)	Informationstyp					
	Produkt-bezogene Informationen	Auftrags-bezogene Informationen	Tätigkeits-bezogene Informationen	Ablauf-bezogene Informationen	Qualitäts-bezogene Informationen	Allgemeine Informationen
	Informationsmenge					
	Gering (Hinweis)		Mittel (Zusammenfassung)		Hoch (vollständige Erklärung)	

Im Gestaltungsfeld Design wird grundlegend zwischen der Wahrnehmung einer Information, dem Modus der Darstellung einer Information sowie zwischen der Intensität einer Information unterschieden. Die Wahrnehmung einer Information erfolgt dabei sehend, hörend oder fühlend, indem beispielsweise mit Vibrationsimpulsen über kritische Situationen oder über Fehler informiert wird. Für Informationen gibt es verschiedene Darstellungsmodi. Eine Möglichkeit ist, dass eine Information zum Beispiel über ein Signal an den Werker herangetragen wird. Applikationen wie Guided-by-Light, Signal-Säulen aber auch Texte, welchen den Werker über die auszuführenden Tätigkeiten informieren, sind Beispiele dafür. Bilder und Animationen sind neben Videos weitere mediale Möglichkeiten der Informationsanzeige. Neben diesen Formen der Informationspräsentation bestehen ergänzende Möglichkeiten, wie Sprachnachrichten. Augmented Reality⁵ (AR) ist eine gegenwärtig intensiv diskutierte Informationsdarstellungsform [104]. Darüber hinaus stellt Virtual Reality eine weitere mediale Informationsrepräsentationsform DAS dar [105]. Da diese Form vor allem im Bereich Planung zur Anwendung kommt, wird diese Präsentationsform im Zuge dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Bei der Intensität der Informationsdarstellung bestehen Möglichkeiten, die Schriftgröße und -farbe neben Bild- und Videogröße und -farbe zu variieren. Im Medium Sprache können Lautstärke und Tonhöhe individuell festgelegt werden [74].

⁵ Bei der Informationsrepräsentationsform AR wird das Sichtfeld des Werkers mit situationsgerechten und computergenerierten Daten im Hinblick auf eine Echtzeit-Interaktion angereichert [97], [98]. AR spricht im Allgemeinen alle menschlichen Sinne an [97], [99], [100]. In der Literatur gibt es jedoch keine einheitliche Erklärung darüber, welche sensorischen Wahrnehmungen in den Aufbau von AR-Systemen einzubeziehen sind. Industrielle Anwendungen stehen gegenwärtig noch am Anfang [101]–[103].

Tabelle 8: Ausprägungen im Gestaltungsfeld Design – Informationsrepräsentation
(eigene Darstellung)

Design – Informationsrepräsentation – wie und in welcher Weise	Wahrnehmung						
	Vision (Sehen)	Audition (Hören)			Haptik (Fühlen)		
	Modus						
	Signal	Text	Bild	Animation	Video	Voice	Augmented Reality
	Intensität						
	Schriftgröße / Schriftfarbe	Bildgröße / Bildfarbe		Videogröße / Videofarbe		Lautstärke / Tonhöhe	

Im Gestaltungsfeld Device – Informationsübertragung wird grundlegend zwischen eingehenden und ausgehenden Informationen unterschieden. Zunächst benötigt das DAS Kenntnis über die digital zu unterstützende Tätigkeit. Diese Informationen lassen sich manuell in das Informationssystem des DAS einprogrammieren. Viele Informationssysteme verfügen jedoch über Schnittstellen zu gängigen Produktionsprogrammplanungssoftwaresystemen, wie beispielsweise SAP [106], aus dem grundlegende Informationen über die Tätigkeitsabfolge aus Montagearbeitsplänen extrahiert und übertragen werden können [107], [108]. Moderne Formen zur Gewinnung von Tätigkeitsausführungsinformationen liegen im Bereich des Business-Process-Planning⁶ oder auch im Bereich Data-Driven-Configuration⁷. Beide Möglichkeiten beziehen sich auf das automatische Generieren von Informationen zur Ausführung von Tätigkeitsschritten, indem zum Beispiel Bildinformationen aus vorliegenden CAD-Files extrahiert und dem Vorrang-Graphen der Montagetätigkeit entsprechend grafisch dargestellt werden. Die Form Data-Driven-Configuration adressiert neben der Erzeugung von reinen Informationen zur visuellen Anzeige auch das Generieren von Programmbefehlen, beispielsweise zur Steuerung und Parametrisierung von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen, welche in der Tätigkeitsausführung vom Werker verwendet werden [64]. Angebundene Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge liefern einen ergänzenden Informationsinput, in dem einzelnen Systeme den Status einer Tätigkeitsausführung zurück-

⁶ Ein Geschäftsprozess oder eine Geschäftsmethode ist eine Sammlung von verwandten, strukturierten Aktivitäten oder Aufgaben von Personen oder Geräten, die in einer bestimmten Reihenfolge eine Dienstleistung oder ein Produkt (dient einem bestimmten Geschäftsziel) für einen bestimmten Kunden oder Kunden erbringen [109].

⁷ In der Computerprogrammierung ist die datengesteuerte Programmierung ein Programmierparadigma, bei dem die Programmieranweisungen die abzugleichenden Daten und die erforderliche Verarbeitung beschreiben und nicht eine Abfolge von Schritten definieren [64].

melden und diese Rückmeldeinformation zum Triggern des nächsten Tätigkeitsschrittes verwendet werden [107]. Klassische Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge sind unter anderem Schraubsysteme, Messsysteme, Leichtbaurobotiken sowie Formen von (Halb-) Automaten. Denkbar sind darüber hinaus auch Systeme, bei denen eine Steuerungsmöglichkeit über speicherprogrammierbare Steuerungssysteme besteht, wie Verspannungssysteme, Reinigungssysteme, Klebesysteme und Verpackungssysteme. Zu nennen sind auch Systeme, welche das Markieren und Montieren von Leitungen und Normteilen unterstützen.

Technische Systeme zur Informationsanzeige von Output-Informationen haben in den vergangenen Jahren eine technische Weiterentwicklung erfahren. Neben Formen wie Monitore, Touch-Monitore, Signalsäulen, Voice-Over-IP-Systeme und Licht- und Projektionssysteme stehen heute vielfältige Systeme aus dem Bereich Tablet, Glas, Laser, Smartphone und Kontaktlinsen mit integriertem Display zur Informationsanzeige in Montageumgebungen zur Verfügung [13]. Die Bedienung solcher Systeme zeigt, dass sie mit einem teilweise hohen Interaktionsaufwand verbunden sind. Vor diesem Hintergrund kommen verstärkt Sensorsysteme für das automatische Triggern des nächsten Tätigkeitsschrittes zum Einsatz. Neben der Funktion einer integrierten Weichschaltung zum nächsten Tätigkeitsschritt leisten diese Systeme einen Beitrag zur Tasksynchronität, das heißt, reale Prozesse sind mit datentechnischen Prozessen (echtzeitfähig) im DAS Informationssystem synchronisiert. Typische Sensorsysteme in diesem Bereich sind zum Beispiel integrierte Näherungssensoren, Vision-Systeme, welche kamera-basiert die Bewegungskinematik oder die Gestik eines Werkers aufnehmen und entsprechende Informationen zur Tätigkeitsausführung identifizieren. Tool- und Hand-Local-Positioning- Sensoren sind weitere Informationsquellen für die Identifikation der Bewegungskinematik und für die Verwendung und Position von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen [12]. Neben diesen Technologien kommen Auto-ID-Technologien zum Einsatz, welche mittels automatisiertem oder manuellem Scannen von Tätigkeitsschritten das Informationssystem mit Informationen über den physischen Tätigkeitsablauf versorgen. Klassische Formen finden sich im Bereich von Schaltern wieder, über welche ein Worker eine erfolgreich abgeschlossene Tätigkeit zurückmeldet [110]. Die angeführten Technologien sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Ausprägungen im Gestaltungsfeld Design – Informationsübertragung
(eigene Darstellung)

Device – Informationsübertragung – Womit	Inputinformation | Aufgabeninformationen					
	Manuelle Konfiguration	Integration mit Kontrollsystem (ERP/MES/...)		Data Driven	...	
	Inputinformation | Aufgabeninformationen					
	Sprache (Voice)	Button	Barcode	Nährungs-sensor	RFID (manuell)	RFID (automat.)
	Hand Local Positioning	Tool Local Positioning	Camera	Gestik	...	...
	Inputinformation | Hilfs-, Betriebsmittel, Werkzeuge					
	Schraub-system	Messsystem	Markierungs-system	Verspan-nungssystem	Reinigungs-system	Robotik-System
	Klebesystem	Halb-Automat	Verpacken	Leitungen montieren	Normteile montieren	...
	Outputinformationen					
	Screen	Touch Screen	Tablet	Glass	Projection	Light
	Sprache (Voice)	Laser	Signal	...	...	...
	Outputinformationen					
	Interaktionssignal (Trigger-Signal) zum Steuerungssystem (PLC/SPS)					
	Schraub-system	Messsystem	Markierungs-system	Verspan-nungssystem	Reinigungs-system	Robotik-System
	Klebesystem	Halb-Automat	Verpacken	Leitungen montieren	Normteile montieren	...

In Bezug auf das Gestaltungsfeld "Data-Processing" als zentrales Interface zur Verknüpfung der in den vorherigen Gestaltungsfeldern aufgezeigten Technologien werden im Folgenden drei unterschiedliche Technology-Readiness-Levels unterschieden. Die Technology-Levels sind dabei wie folgt definiert [111]:

- Technology-Readiness-Level 1-4: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips, Beschreibung der Anwendung einer Technologie, Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie
- Technology-Readiness-Level 4 -7: Versuchsaufbau im Labor, Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, Prototyp in Einsatzumgebung, Prototyp im Einsatz
- Technology-Readiness-Level 8 - 9: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich, qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Die unterschiedlichen Technology-Readiness-Level folgen dabei dem technischen Entwicklungsstatus der einzelnen Technologien und den technischen Möglichkeiten

und Abhängigkeiten der einzelnen Technologien bei der Kombination. Die zusammenfassende grafische Darstellung der Morphologie DAS erfolgt in Abbildung 52 im Anhang.

Im Folgenden werden die im morphologischen Kasten dargestellten Komponenten DAS in sogenannten Technologie-Pools zusammengefasst und Bedingungen der Verknüpfung der einzelnen Komponenten DAS im Hinblick auf Gewährleistung der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit eines DAS aufgezeigt. Es werden T-Pool, D-Pool, TS-Pool, IR-Pool, II-Pool und IP-Pool unterschieden⁸. Die Zuordnung wird auf Grundlage auf Grundlage der entwickelten Morphologie DAS (vgl. Abbildung 52 im Anhang) in Abbildung 16 dargestellt.

Degree (Informationsgrad) WAS	Komponenten DAS zusammengefasst im IR-Pool											
	Signal	Text	Bild / Animation	Video	Sprache	Augmented Reality						
Device (Informationsübertragung) WOMIT	Komponenten DAS zusammengefasst im II-Pool											
	Manuelle Konfiguration		Integration in Kontroll-System (ERP/MES/...)			BPM (Data Driven Configuration)		...				
	Komponenten DAS zusammengefasst im TS-Pool											
	Detektion mittels Sprache	Detektion mittels Button (manuell)	Detektion mittels Button (automatisch)	Detektion mittels Nahrungssensorik	Detektion mittels RFID (manuell)	Detektion mittels RFID (automatisch)	Detektion mittels Hand-Local-Positioning	Detektion mittels Werkzeug-Local-Positioning	Detektion mittel Kamera			
	Komponenten DAS zusammengefasst im D-Pools											
	Screen	Touch Screen	Tablet	Glass	Projection	Light	Voice	Laser	Signal			
	Komponenten DAS zusammengefasst im T-Pools											
	Schraubsystem	Messsystem	Markierungssystem	Verspannungssystem	Reinigungssystem	Robotiksystem	Klebsystem	Halb-Automat	Verpacken	Leitungen-Montierung	Normteile montieren	
	Informationssystem (Data-Processing)	Komponenten DAS zusammengefasst im IP-Pools										
		Technology Readyness Level 9 - 8			Technology Readyness Level 7 - 5				Technology Readyness Level 4 - 1			

Abbildung 16: Zuordnung von Technologie-Pools DAS entlang der Morphologie DAS (eigene Darstellung)

Das T-Pool fasst technische Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge zusammen, welche durch Anbindung an ein DAS Informationssystem integriert gesteuert und überwacht werden. Die folgende Tabelle zeigt die, in dieser Arbeit betrachteten Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge auf, deren Investitionserfordernisse im Anhang in Tabelle 99 dargestellt sind.

⁸ Klassifizierung durch Autor

Tabelle 10: Komponenten DAS zusammengefasst im T-Pool (eigene Darstellung)

Bezeichnung	Komponenten
T ₁	Schraubsysteme
T ₂	Mess- und Prüfarbeiten*
T ₃	Markierarbeiten*
T ₄	Einspann- und Auspannarbeiten*
T ₅	Behandlungsarbeiten*
T ₆	Kollaborative Robotiksysteme
T ₇	Klebearbeiten*
T ₈	Diverse Halbautomaten
T ₉	Verpackungsarbeiten*
T ₁₀	Leitungenmontierarbeiten*
T ₁₁	Normteilemontierarbeiten*

*hierunter sind technische Systeme in Bezug auf Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge zu verstehen

Unter dem D-Pool sind Ein- und Ausgabegeräte DAS (Devices) zusammengefasst. Über die Komponenten des D-Pools erfolgt die Informationsübertragung an den Werker sowie Rückmeldeinformationen des Werkers an das DAS Informationssystem. Tabelle 100 im Anhang verdeutlicht damit verbundenen Investitionserfordernisse. Die folgende Tabelle zeigt die, in dieser Arbeit betrachteten Technologien des D-Pools auf. Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass die Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Tabelle 11: Komponenten DAS zusammengefasst im D-Pool (eigene Darstellung)

Bezeichnung	Komponenten
D ₁	Screen
D ₂	Touch-Screen
D ₃	Tablet
D ₄	Glass
D ₅	Projektion
D ₆	Lichtsignale (Signal)
D ₇	Sprachausgabe
D ₈	Lasersignal (Signal)

Im TS-Pool sind technische Sensorsysteme zusammengefasst, welche es ermöglichen, die physische Tätigkeitsausführung des Werkers mit der Informationsdatenverarbeitung des DAS Informationssystems zu synchronisieren. Das TS-Pool dient zur Realisierung der Konvergenz zwischen physischem Ablaufprozess und digitalem Verarbeitungsprozess des Informationssystems. Im Anhang verdeutlicht Tabelle 101 damit verbundenen Investitionserfordernisse. Die folgende Tabelle zeigt die, in dieser Arbeit betrachteten Technologien des TS-Pools auf. Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass die Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Tabelle 12: Komponenten DAS zusammengefasst im TS-Pool (eigene Darstellung)

Bezeichnung	Komponenten
TS ₁	Spracheingabe
TS ₂	Druckknopf
TS ₃	Integrierter Näherungsschalter
TS ₄	Barcode (manuelles Scannen)
TS ₅	Barcode (automatisches Scannen)
TS ₆	RFID (manuelles Einlesen)
TS ₇	RFID (automatisches Einlesen)
TS ₈	Hand Local Positioning Sensoriken
TS ₉	Tool Local Positioning Sensoriken
TS ₁₀	Steuerungssignaltrigger (SPS/PLC)
TS ₁₁	Kamera- / Gestikerkennung

Im IR-Pool sind Informationsausgabeformen DAS zusammengefasst. Dabei werden vor allem Formen der Informationsdarstellung unterschieden. Die Tatsache, dass Informationsdarstellungsformen auch miteinander kombinierbar sind, wird aus Gründen der Übersicht vernachlässigt. Tabelle 102 im Anhang zeigt damit verbundenen Investitionserfordernisse. Die folgende Tabelle zeigt die in dieser Arbeit betrachteten Technologien des IR-Pools. Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass die Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Tabelle 13: Komponenten DAS zusammengefasst im IR-Pool (eigene Darstellung)

Bezeichnung	Komponenten
IR ₁	Signal
IR ₂	Textinformationen
IR ₃	Bilder
IR ₄	Animationen
IR ₅	Videos
IR ₆	Spracheingabe
IR ₇	Augmented Reality
IR ₈	Steuerungsbefehle für Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge

Ferner sind im II-Pool Schnittstellen zu Grundinformationssystemen, welche als Basis der Informationsdarstellung (Content Informationen) der einzelnen zu assistierenden Tätigkeiten dienen [64]. Im Anhang werden in Tabelle 103 damit verbundenen Investitionserfordernisse aufgezeigt. Die folgende Tabelle zeigt die in dieser Arbeit betrachteten Technologien des II-Pools auf. Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass die Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Tabelle 14: Komponenten DAS zusammengefasst im II-Pool (eigene Darstellung)

Bezeichnung	Komponenten
II ₁	Manuelle Konfiguration
II ₂	Verbindung mit Kontrollsystem (ERP-/ME-System)
II ₃	Produkt (datengesteuert über CAD)

Das IP-Pool fasst unterschiedliche Informationssysteme DAS in Abhängigkeit einzelner Komponenten aus den Pools T, D, TS, IR und II zusammen. Die hier gewählten Komponenten sind als Technologie-Readiness-Level (TRL) angegeben. Die Berücksichtigung der Technologie-Readiness-Level repräsentieren den Forschungs- und Entwicklungsaufwand in Bezug auf die Bildung eines funktionsfähigen DAS. Tabelle 104 im Anhang verdeutlicht die damit verbundenen Investitionserfordernisse. Es gelten folgende Bedingungen zur Betrachtung der Komponenten des IP-Pools:

Tabelle 15: Komponenten DAS zusammengefasst im IP-Pool (eigene Darstellung)

Bezeichnung	Komponente (Technology-Readiness-Level)	Abhängigkeiten von anderen Komponenten
IP ₁	Technology-Readiness-Level 1-3	wenn keine der folgenden Komponenten identifiziert wurden: TS ₈ und / oder / TS ₉ und / oder TS ₁₀ und / oder IR ₇ und / oder II ₂ und / oder TS ₁₁ und / oder TS ₁₀ und / oder II ₃
IP ₂	Technology-Readiness-Level 4-7	wenn folgende Komponenten identifiziert wurden: TS ₈ und / oder / TS ₉ und / oder TS ₁₀ und / oder IR ₇ und / oder II ₂
IP ₃	Technology-Readiness-Level 8-9	wenn folgende Komponenten identifiziert wurden: TS ₁₁ und / oder TS ₁₀ und / oder II ₃

5.1.2 Beschreibungskriterien digitaler Assistenzsysteme

LUŠIĆ ET AL. (2016) führen im Zuge einer Auswahl und Selektion von Komponenten Werkerinformationssystemen acht zentrale Beschreibungskriterien (Beschreibungsparameter) auf, welche im Folgenden beschrieben und ergänzt werden [104]:

- **Mobilitätsgrad (Degree of Mobility):** Einem Werker ist es möglich, Arbeitsinhalte an verschiedenen Arbeitsplätzen und auf Arbeitspositionen auszuführen. DAS werden ihrem Mobilitätsgrad entsprechend in stationäre und mobile DAS unterteilt [104], [112].
- **Kognitive Werkerbelastung (Cognitive Work Load):** DAS sind in der Lage, Informationen statisch und / oder dynamisch bereitzustellen. Statische Informationsdarstellungen, wie Bilder und Texte, sind zeitinvariant. Die genaue Abfolge der einzelnen Prozessschritte ist durch den Werker selbst zu extrahieren mit entsprechendem kognitivem Aufwand. Der kognitive Aufwand wird minimiert, wenn temporäre Sequenzen darstellbar sind, wie beispielsweise durch Videos, Filme oder Animationen. Aufgrund ihrer zeitlichen Varianz erfordert die dynamische Darstellung von Informationen jedoch eine Anpassung ihrer Dauer an die Bedürfnisse des Werkers [104], [112], [113].

- **Flexibilitätsgrad (Degree of Flexibility):** DAS sind in der Lage, einzelne Prozessschritte zu beschreiben. Klassischerweise folgen diese einer starren, verketteten Sequenz. Diese deterministische Art der Werkerführung erfordert reibungslose Prozesse, denn wenn ein einzelner Produktionsschritt nicht korrekt abgeschlossen wird, ist die Prozesskette unterbrochen. Die adaptive Werkerführung ermöglicht es, situationsbezogenen Arbeitsinhalte zu bestimmen und Arbeitsabläufe dynamisch anzupassen, indem zustandsbasierte Grafiken verwendet werden [104], [113], [114].
- **Informationsquellen (Source of Information):** Neben einer manuellen Konfigurationsmöglichkeit sind DAS auch durch Schnittstellen mit anderen Informationssystemen konfigurierbar [104], [107].
- **Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (Time of Information Provision):** Im Hinblick auf den Zeitpunkt einer Informationsbereitstellung bieten DAS die Möglichkeit, Informationen synchron zum Ausführungsprozess bereitzustellen. Für eine synchrone Bereitstellung sind die Aktivitäten der Tätigkeitsausführung des Werkers kontinuierlich zu erfassen und zu verfolgen [104].
- **Zugang zu der Werkerinformation (Access to Worker Information):** Neben arbeitsplatzspezifischen DAS sind arbeitsgruppenbezogene Informationsterminals möglich. Diese Zentralisierung ermöglicht die Minimierung der Anzahl notwendiger Informationssysteme und Ausgabegeräte (Devices) von DAS [104].
- **Reale versus virtuelle Informationsdarstellung (Real Versus Virtual Worker Information):** DAS sind in der Lage, verschiedene Informationen mit unterschiedlichen Visualisierungs- und Medienmodi darzustellen. Diese Formen reichen von einfachen Signalinformationen, Texten, Bildern, Animationen, Videoinformationen bis hin zu Darstellungsformen im Bereich der Augmented Reality. Während einfache Informationsformen geringe Datenverarbeitungskapazitäten benötigen, erfordern komplexe Informationsformulare größere Datenverarbeitungskapazitäten [104].
- **Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (Ability to Dialog):** Durch Verknüpfung DAS mit unterschiedlichen Steuerungssystemen besteht die Möglichkeit, Betriebsdaten und Statusinformationen von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen mit dem Informationssystem des DAS zu verbinden, entsprechende Daten zu speichern, zu dokumentieren und dies in Folge in einer Datenanalyse zu nutzen [104].

Da sich diese Arbeit auf DAS bezieht, die interaktiv mit anderen technischen Systemen im Arbeitssystem kommunizieren und mit dem Werker interagieren, ist eine weitere Form der Werkerführung realisierbar [107] und ein weiterer Beschreibungsparameter DAS zu ergänzen.

- Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs- und Betriebsmitteln (Ability to Interact with Other Tools): Durch eine Verbindung DAS mit anderen technischen Systemen sind DAS in der Lage, durch Interaktion mit diesen Systemen dem Werker eine weitere interaktive Unterstützung zu bieten. Durch eine Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen bestehen Möglichkeiten zur Vermeidung von Ausführungsfehlern.

Ein weiterer zentraler Beschreibungsparameter ist die Motivation und Akzeptanz des DAS durch den Werker. Dieser Beschreibungsparameter bezieht sich vor allem auf die Komponenten, mit welchen der Werker in direkter Interaktion steht. In Übereinstimmung mit dem oben beschriebenen morphologischen Kasten (vgl. im Anhang Abbildung 52) sind hier die Ausgabegeräte (Devices) sowie die Art und die Form der Informationsausgabe anzusprechen.

- Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit des Systems: Bezeichnet die Benutzerfreundlichkeit eines Systems. Zusammen mit den Merkmalen Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit hat die Benutzerfreundlichkeit des Systems einen wesentlichen Einfluss auf Akzeptanz und Motivation der Benutzer [115].

Im folgenden Abschnitt werden die aufgezeigten Beschreibungsparameter DAS detailliert beschrieben und deren Verknüpfungen mit den einzelnen Komponenten DAS entlang der entwickelten Morphologie dargestellt. Darüber hinaus werden Möglichkeiten zur quantitativen Beschreibung der aufgezeigten Eigenschaften und Merkmale untersucht und aufgezeigt. Die Untersuchung und Darstellung adressiert das Aufzeigen von Möglichkeiten und Anforderungen zur quantifizierten Bestimmung der Beschreibungsparameter basierend auf direkten und indirekten Informationen der Methode MTM sowie erweiterten Informationen, welche in frühen Phasen des PEPs entstehen.

5.2 Formulierung der Beschreibungsparameter digitaler Assistenzsysteme

In diesem Abschnitt erfolgt eine Darstellung, wie eine Bestimmung der einzelnen Beschreibungsparameter DAS (vgl. Kapitel 5.1.2) möglich ist und auf welche Art und Weise Informationen auf Basis einer Methode MTM-UAS Analyse dafür nutzbar sind. Hierzu wird der benötigte Informationsgehalt der Methode MTM analysiert und im Falle von Informationsengpässen mit ergänzenden Informationen aus frühen Phasen der

Produktentwicklung ergänzt. Eine Quantifizierung der Beschreibungsparameter erfolgt auf Basis von Tendenzkennzahlen.

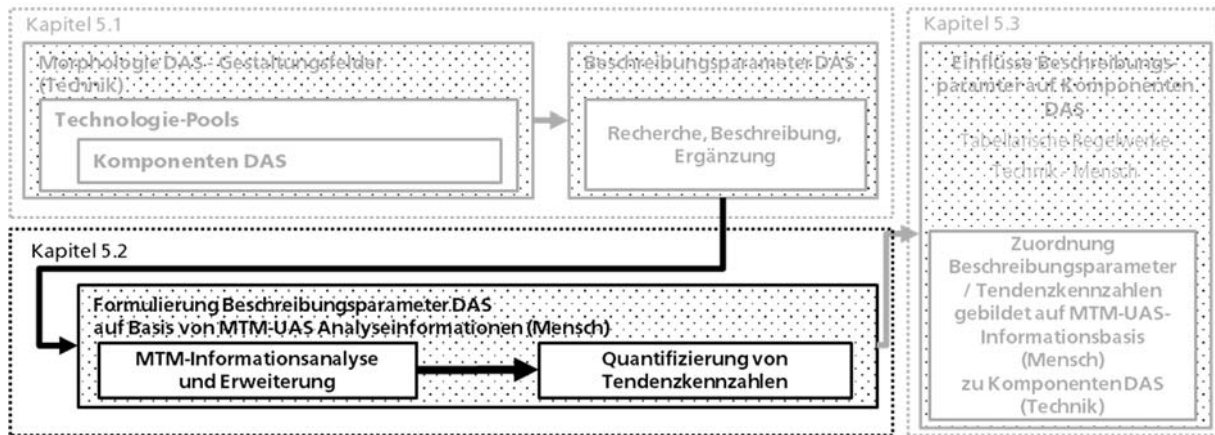


Abbildung 17: Einordnung Formulierung Beschreibungsparameter DAS auf Basis der Methode MTM (eigene Darstellung)

5.2.1 Mobilitätsgrad

Der Mobilitätsgrad digitaler Assistenzsysteme beschreibt den Grad der Mobilität des DASs. Der Beschreibungsparameter bezeichnet die Mobilität des Ausgabegerätes (Devices), auf welchem dem Werker eine Information angezeigt wird, beziehungsweise mit dem der Werker interagiert. Dabei wird der Beschreibungsparameter zum einen darüber quantifiziert, wie häufig und ausgeprägt die Bewegungen des Werkers bei der Ausführung seiner Tätigkeit sind. Die im Folgenden vorgenommene Quantifizierung des Degree of Mobility dient einer Tendenzeinordnung der unterschiedlichen Ausgabegeräte digitaler Assistenzinformationen und ist likert-skaliert. Dabei wird ein geringer Mobilitätsgrad des Ausgabegeräts mit den Tendenzkennzahlen 0 - 1, ein mittlerer Mobilitätsgrad des Ausgabegeräts mit den Tendenzkennzahlen 1 - 2 und ein hoher Mobilitätsgrad des Ausgabegeräts mit den Tendenzkennzahlen 2 - 4 bewertet. Die aufgezeigten Tendenzkennzahlen sind mit einer MTM-UAS Analyse bestimmbar, indem die Tendenzkennzahl der absoluten Häufigkeiten von Körperbewegungen (MTM-UAS: KA, KB, KC) und der visueller Kontrollen (MTM-UAS: VC) [86] entspricht.

Tabelle 16: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter Mobilitätsgrad (eigene Darstellung)

Mobilitätsgrad	Tendenzkennzahl		
	gering 0 - 1	mittel 1 - 2	hoch 2 - 4

Ein klassischer Monitor (Screen), welcher in der Regel fest an einem Standort installiert ist, weist einen geringen Mobilitätsgrad auf. Der Werker erhält die Möglichkeit,

freihändig zu arbeiten. Im Falle einer hohen und starken Bewegungsanzahl des Werkers bedeutet ein fest installierter Monitor, dass der Werker sich mehrmals während der Tätigkeitsausführung zum Monitor (Screen) hindrehen, gegebenenfalls seine Arbeitsposition verlassen und sich zum Monitor hinbewegen muss. Das gilt auch für einen Touch-Monitor (Touch-Screen). Das Device eines Tablets oder auch eines Hand-Terminals ermöglicht einen mobileren Einsatz am Ort der Verwendung. Die Anzahl der Bewegungen hin zur Informationssenkens wird auf diese Weise reduziert. Jedoch erfordern Tablets und Hand-Terminals auch einer Ablage. Ferner sind oftmals auf Grund der eingeschränkten Möglichkeit, visuelle Anweisungen in einer großen Repräsentationsform anzuzeigen, vielfältige Aufnahme- und Ablagetätigkeiten mit diesen Devices verbunden (aufnehmen / ablegen und in die Hand nehmen). Zudem besteht ein Risiko, das mobile Device suchen zu müssen. Einen sehr hohen Mobilitätsgrad weisen hingegen Glass-Devices oder auch Head-Mounted-Displays sowie Kontaktlinsen-Bildschirme auf. Diese Informationsausgabegeräte ermöglichen es dem Werker, freihändig und auf verschiedenen Arbeitspositionen seine Tätigkeit auszuführen, ohne für die Informationsaufnahme an einen bestimmten Ort gebunden zu sein.

Als weiteres Device mit hohem Mobilitätsgrad und der Möglichkeit, Tätigkeiten freihändig auszuführen, ist die Technologie Voice (Sprachausgabe). Hierbei werden dem Werker über ein kabelloses Headset (via Sprache) ausführungsunterstützende Informationen gegeben. Devices mit einer mittleren Mobilität sind Technologien der Projektion und Laser. Sowohl mittels einer Projektion als auch über Laserprojektionen ist es möglich, über eine begrenzte Entfernung hinweg Informationen zu visualisieren. Im Vergleich zu Glass-Devices, Head-Mounted-Displays und Kontaktlinsen-Bildschirmen ist dabei jedoch die Mobilität begrenzt. Die Informationsausgabe über Lichtsignale, beispielsweise in Form von Pick-and-Place-by-Light-Technologien oder Signalsäulen, ist eine stark ortsgebundene Informationsausgabeform. Pick-and-Place-by-Light-Technologien und Signalsäulen sind an einem festen Ort montiert. Eine detaillierte Zuordnung der Tendenzkennzahlen zu den einzelnen Komponenten erfolgt im Anschluss an diesen Kapitelabschnitt.

5.2.2 Kognitive Werkerbelastung

Die kognitive Werkerbelastung in Arbeitssystemen korreliert mit der Komplexität des Arbeitssystems, in welchem der Werker agiert [116]. Dabei sind drei zentrale Komplexitätstypen zu unterscheiden, welche im Folgenden beschrieben werden [117].

- Produktkomplexität,
- Prozesskomplexität und
- organisatorische Komplexität.

Kognitive Belastungen treten in der Montage dann verstärkt auf, wenn sich Aufgabenstellungen für den Werker häufiger ändern und diese mit hohen Ausführungsanforderungen verbunden sind. Der Werker muss aufgrund des momentanen Produktzustandes selbst die nächsten notwendigen Tätigkeiten erkennen und umsetzen oder die ihm mitgeteilten Informationen wahrnehmen und richtig interpretieren, um anschließend die adressierten Aufgaben erfüllen zu können. Situationselastisches Handeln und Lernen sind somit zwei wesentliche Merkmale der Kognition⁹ in der Montage. Es wird angenommen, dass ein kognitives System folgende Komponenten umfasst [120]:

- Gedächtnissystem
- Interne, symbolische Repräsentation der Umgebung
- Prozesse, die über eine interne Repräsentation verfügen
- Prozesse, die als Ergebnis interner Verarbeitung Verhalten generieren
- Systeme für Wahrnehmung und Motorik als Schnittstellen mit der Umgebung

Die Messung kognitiver Belastung kann in physiologische, aufgaben- und leistungsbaasierte sowie subjektive Fragebogenverfahren eingeteilt werden [121]. Eine genauere Beschreibung dieser Verfahren ist bei JAHN (2011) nachzulesen [122]. Zur Identifikation und Bestimmung eines kognitiven Unterstützungsbedarfs setzen CLAEYS ET AL. (2015) innerhalb eines grundlegenden Regelwerks auf eine synchrone Betrachtung von Produktkomplexität und Arbeitsplatzkomplexität [24]. Diesem schematischen Regelwerk wird in dieser Arbeit gefolgt.

Zur Bestimmung der Produktkomplexität greifen CLAEYS ET AL. (2015) die Definition von SAMY und ELMARAGHY (2010) auf. Auf Grund der Tatsache, dass die Definition von Produktkomplexität vielfach am Beispiel der Montage erprobt worden ist, schließt sich diese Arbeit der Definition von SAMY und ELMARAGHY (2010) an. Produktkomplexität ($C_{I\text{Produkt}}$) nach SAMY und ELMARAGHY (2010) ist als das Ausmaß der Schwierigkeit der Tätigkeitsausführung definiert. Die Produktkomplexität ($C_{I\text{Produkt}}$) stellt dabei die Summe der Komplexität der Handhabung und Montage der innerhalb

⁹ Für den Begriff der Kognition existieren mehrere Definitionen, welche in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedlich verwendet werden. Zum einen steht Kognition als Sammelbegriff für Vorgänge oder Strukturen, die mit Gewahrwerden und Erkennen zusammenhängen. Darunter sind Wahrnehmung, Erinnerung (Wiedererkennen), Vorstellung, Gedanke, aber auch Vermutung sowie Erwartung, Plan und Problemlösen zu verstehen [118]. Zum anderen wird Kognition als Ausdruck für jeden Prozess verstanden, durch den ein Lebewesen Kenntnis von einem Objekt erhält oder sich seiner Umwelt bewusst wird. Dazu zählen: Wahrnehmung, Erkennen, Vorstellen, Urteilen, Gedächtnis, Lernen, Denken und auch Sprache [119].

einer Montage-Aufgabe adressierten Teile und Baugruppen dar, die mit dem Prozentsatz (x) der Gleichheit der Teile und Baugruppen multipliziert wird, wobei n die Anzahl der eindeutigen Teile und Baugruppen repräsentiert [24], [123].

$$CI_{Produkt} = \sum_{i=1}^n x_i C_{Teil} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die Komplexität der Teile und Baugruppen (C_{Teil}) wird durch den gewichteten Durchschnitt der durchschnittlichen Handhabungskomplexität (C_h), welche durch das Formteildesign determiniert ist, und der durchschnittlichen Montagekomplexität (C_i) determiniert durch die Aufgabe und die Werkzeughandhabung, nach SAMY und ELMA-RAGHY (2010) [123] bestimmt.

$$C_{Teil} = \frac{C_h \sum_{h=1}^J C_{h,f} + C_i \sum_{i=1}^K C_{i,f}}{\sum_{h=1}^J C_{h,f} + \sum_{i=1}^K C_{i,f}} \quad \text{Gleichung 2}$$

In weiterer Folge werden Abschnitte definiert, um die resultierende Produktkomplexität einzuordnen. Dies folgt getroffenen Annahmen auf Grundlage des Kurvenverlaufs von $CI_{Produkt}$, da keine verwendbaren Produktkomplexitätsintervalle in der Literatur vorliegen. Die Intervalle sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Produktkomplexitätsintervalle (eigene Darstellung)

Produktkomplexität	sehr gering 0 – 2	gering 2 – 3	mittel 3 – 5	hoch 5 – 7	sehr hoch 7 – 9
--------------------	----------------------	-----------------	-----------------	---------------	--------------------

Zur Bestimmung der Komplexität eines Arbeitsplatzes zeigen ZELTZER ET AL. (2012) einige Beispiele für Komplexitätstreiber eines Arbeitsplatzes auf [116]. Da das Vorgehen von ZELTZER ET AL. (2012) am Beispiel der Montage entwickelt und bereits vielfach erprobt worden ist, schließt sich diese Arbeit dem Vorgehensmodell von ZELTZER ET AL. (2012) zur Bestimmung einer quantifizierten Arbeitsplatzkomplexität an [116].



Abbildung 18: Komplexitätstreiber eines Arbeitsplatzes [116]

In Bezug auf die dargestellten Komplexitätstreiber haben ZELTZER ET AL. (2012) ein spezifisches Skalenmodell entwickelt, mit dessen Hilfe die Komplexität eines Arbeitsplatzes bestimmbar ist [116]. Im Anhang wird mit Abbildung 53 ein Auszug des Skalenmodells dargestellt. Die Arbeitsplatzkomplexität hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die mentale Beanspruchungssituation der Werker. Zur weiteren Bestimmung der Arbeitsplatzkomplexität wird auf ZHU ET AL. (2008) verwiesen, die in einer Produktmatrix entsprechende Produktinformationen einer Mixed-Modell-Montage [42] strukturieren. Dabei stellt P_{ij} die Nachfrage nach der Variante j in Bezug auf ein Produkt i dar [124].

$$\begin{bmatrix} p_{ij} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \tag{Gleichung 3}$$

Jeder Zeile entsprechend ist das Verhältnis Produkt zu Variante wie folgt beschreibbar:

$$\sum_j p_{ij} = 1, \quad \forall i \tag{Gleichung 4}$$

Die Höhe des Verhältnisses von Produkt zu Variante determiniert die mentale Beanspruchung des Werkers. Die kognitive Beanspruchung definieren ZHU ET AL. (2008) dabei als Entropie H . Diese dient der Quantifizierung der kognitiven Belastungssituation des Werkers, welche durch die Auswahl- und Entscheidungskomplexität in Bezug auf alternative Aufgabentätigkeiten zum Beispiel zur Auswahl der richtigen Teile und Baugruppen, der Verwendung der richtigen Werkzeuge und der Durchführung der richtigen Reihenfolge der Aufgabentätigkeit bestimmt wird. Der Faktor p_m stellt dabei den prozentuellen Anteil der aufgestellten Produktmatrix entsprechend dar [124].

$$H(p_1, p_2, \dots, p_m) = - \sum_{m=1}^M p_m \log_2 p_m \tag{Gleichung 5}$$

Die für eine Arbeitsstation spezifische Auswahl- und Entscheidungskomplexität wird nach ZHU ET AL. (2008) wie folgt berechnet [124].

$$C_j = \sum_{k=1}^K \alpha_j^k H_j^k, \alpha_j^k > 0, k = 1, 2, \dots, K \quad \text{Gleichung 6}$$

Hierbei steht K für die Anzahl der sequenziellen Montagetätigkeiten; α_j^k für die Ausprägung der Montageschwierigkeit der k^{th} Montagetätigkeiten in Arbeitsstation j; H für die Entropie kumuliert über K Montagetätigkeiten an Arbeitsstation j.

Die in dem folgenden Beispiel angeführte Berechnung basiert auf einer von ZELTZER (2012) definierten Formel zu Bestimmung der Arbeitsplatzkomplexität mit geringer Ausprägung. Die Formel berücksichtigt dabei die Anzahl verschiedener Teile im Arbeitssystem (PWL), die Anzahl von Behältern im Arbeitssystem (PTL), die Anzahl unterschiedlicher Montagepositionen des Werkers (ADL) sowie die Anzahl verschiedener Werkzeuge am Arbeitsplatz (TWL) [116].

$$P(LOW) = \frac{e^{18.164-3173PWL-2326PTL-2182ADL-0.344TWL}}{1 + e^{18.164-3173PWL-2326PTL-2182ADL-0.344TWL}} \quad \text{Gleichung 7}$$

In weiterer Folge werden Abschnitte definiert, um die resultierende Arbeitsplatzkomplexität einzuordnen. Dies folgt getroffenen Annahmen auf Grundlage des Kurvenverlaufs von P_{LOW} da keine verwendbaren Arbeitsplatzkomplexitätsintervalle in der Literatur vorliegen. Die Intervalle sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Arbeitsplatzkomplexitätsintervalle (eigene Darstellung)

Arbeitsplatzkomplexität	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	1 – 0,9	0,9 – 0,6	0,6 – 0,4	0,4 – 0,2	0,2 – 0

Zur Quantifizierung der oben dargestellten und beschriebenen Arbeitsplatz- und Produktkomplexität stellt eine einfache MTM-UAS Analyse keine direkt ableitbaren Informationen zur Verfügung. Die Handhabungskomplexität C_h , sowie die Montagekomplexität C_i ist auf Basis der von SAMY & EIMARAGHY (2010) definierten Montageattributen für die manuelle Montage sowie auf Basis der von SAMY & EIMARAGHY (2010) definierten, durchschnittlichen Symmetrie-Schwierigkeitsfaktoren der zu handhabenden Materialien und Bauteile C_f zu bestimmen [123]. Je nach Informationsgehalt der einzelnen Tätigkeitsbeschreibung in einer MTM-UAS Analyse und dem Vorhandensein zusätzlicher Informationen, beispielsweise im Kontext einer CAD-Datei und verbundenen eBOMs und mBOMs, besteht die Möglichkeit, diese Informationen direkt zu identifizieren [64].

In Analogie zu SAMY & EIMARAGHY (2010) ist eine MTM-UAS Analyse auch dahingehend zu ergänzen, dass nach ZELTZER (2012) die Arbeitsplatzkomplexität zu bestimmen ist. Durch Ergänzung der Beschreibungstexte einer MTM-UAS Analyse von den zu verbauenden Materialien und Bauteile besteht die Möglichkeit, die Anzahl verschiedener Teile im Arbeitssystem (PWL) sowie die Anzahl von Behältern im Arbeitssystem (PTL) zu bestimmen. Ferner besteht die Möglichkeit, durch explizite Nennung der für jede Montagetätigkeit benötigten Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge die Anzahl verschiedener Werkzeuge am Arbeitsplatz (TWL) festzulegen. Durch Analyse der MTM-UAS Bauteile KA, KB, KC kann die Anzahl unterschiedlicher Montagepositionen des Werkers (ADL) bestimmt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Identifikation von Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität nach SAMY & EIMARAGHY (2010) sowie nach ZELTZER (2012) durch eine Informationsanreicherung der Beschreibungstexte in einer MTM-UAS Analyse möglich ist und zwar durch Nutzung korrelierender Informationen zum Produkt. Durch gezielte Datenanalyse unter Verwendung der Regelwerke nach SAMY & EIMARAGHY (2010) sowie nach ZELTZER (2012) besteht die Möglichkeit einer direkten Bestimmung von Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität. Diese Arbeit folgt der manuellen Bestimmung Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität nach den Regelwerken von SAMY & EIMARAGHY (2010) sowie nach ZELTZER (2012) [116], [123].

Die in der folgenden Tabelle dargestellten Tendenzkennzahlen, ermittelbar über die Vorgehensmodelle von ZELTZER (2012) in Bezug auf die Arbeitsplatzkomplexität und von SAMY & EIMARAGHY (2010) in Bezug auf die Produktkomplexität [81], [118] folgen der Annahme von CLAYES ET AL. (2015), dass eine jeweils steigende Komplexität eine steigende kognitive Werkerbelastung bedingt. Eine detaillierte Zuordnung der Tendenzkennzahlen zu den einzelnen Komponenten erfolgt im Anschluss an diesen Kapitelabschnitt.

Tabelle 19: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter kognitive Werkerbelastung (eigene Darstellung)

Kognitive Werkerbelastung	Tendenzkennzahl				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Arbeitsplatzkomplexität	Tendenzkennzahl				
	sehr gering 1 – 0,9	gering 0,9 – 0,6	mittel 0,6 – 0,4	hoch 0,4 – 0,2	sehr hoch 0,2 - 0
Produktkomplexität	Tendenzkennzahl				
	sehr gering 0 – 2	gering 2 – 3	mittel 3 – 5	hoch 5 – 7	sehr hoch 7 – 9

5.2.3 Flexibilitätsgrad

Der Beschreibungsparameter Flexibilitätsgrad adressiert, in Analogie zu dem Beschreibungsparameter Informationsquelle, die Verbindung des DAS Informationssystems mit Datenquellen, aus welchen die zu repräsentierenden Informationsinhalte stammen, beziehungsweise generiert werden. Durch diese Analogie erfolgt eine Zuordnung in derselbiger Form entlang derselben Tendenzkennzahlen, wie zu dem Beschreibungsparameter Informationsquelle, nach folgender Tabelle.

Tabelle 20: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter Flexibilitätsgrad (eigene Darstellung)

Flexibilitätsgrad	Tendenzkennzahl (hier absolute Anzahl der Produkte)		
	gering 1	mittel 2 - 5	hoch > 5
	Tendenzkennzahl (hier absolute Anzahl der Produktvarianten)		
	gering 1	mittel 2 - 10	hoch > 10

Eine Bestimmung der einzelnen Tendenzkennzahlen ist ausschließlich durch eine ergänzte MTM-UAS Analyse möglich, in welcher zu jeder Tätigkeit die adressierte Produktfamilie, das Produkt und seine spezifischen Produktvarianten angeführt sind. Eine detaillierte Zuordnung der Tendenzkennzahlen zu den einzelnen Komponenten erfolgt im Anschluss an diesen Kapitelabschnitt.

5.2.4 Informationsquellen

Der Parameter Informationsquellen beschreibt die Verbindung des DAS Informationssystems mit Datenquellen, aus welchen die zu repräsentierenden Informationsinhalte generiert oder bereitgestellt werden. Dabei besteht die Möglichkeit, das Informationssystem grundsätzlich manuell oder durch eine Verbindung mit einem übergeordneten Kontrollsystem, wie beispielsweise einem ERP-System, mit den benötigten Informationen zu versorgen. Der Informationsdetaillierungsgrad ist dabei vom Informationsgrad der in solchen Systemen hinterlegten Stammdaten abhängig. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass das DAS Informationssystem mit einem Mediengenerator verbunden ist, welcher auf zentrale Produktdaten zugreift, zum Beispiel auf CAD-Daten, und benötigte Informationen auch zur Steuerung und Überwachung von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen erstellt und dem DAS zur Verfügung stellt [64].

Entscheidend bei der Definition der DAS Informationsquellen ist der administrative Aufwand. Es wird an dieser Stelle der Annahme gefolgt, dass der grundsätzliche administrative Aufwand von der Anzahl der unterschiedlichen Produkte sowie von der Anzahl der jeweils unterschiedlichen Produktvarianten bestimmt ist. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über angenommene Tendenzkennzahlen auf Basis einer Anzahl

von Produkten und Produktvarianten, zu denen entsprechende Informationen mittels DAS anzuzeigen sind [64].

Tabelle 21: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter Informationsquellen
(eigene Darstellung)

Informationsquellen	Tendenzkennzahl (Anzahl Produkte)		
	gering 1	mittel 2 - 5	hoch > 5
	Tendenzkennzahl (Anzahl Produktvarianten)		
	gering 1	mittel 2 - 10	hoch > 10

Eine Bestimmung der einzelnen Tendenzkennzahlen wird durch eine ergänzte MTM-UAS Analyse möglich, in welcher zu jeder Tätigkeit die adressierte Produktfamilie, das Produkt sowie deren spezifische Produktvariante angeführt ist. Eine detaillierte Zuordnung der Tendenzkennzahlen zu den einzelnen Komponenten erfolgt im Anschluss an diesen Kapitelabschnitt.

5.2.5 Zeitpunkt der Informationsbereitstellung

Der Beschreibungsparameter Zeitpunkt der Informationsbereitstellung bezeichnet den Bedarf nach Informationen in Echtzeit. Hierzu bedarf es einer direkten Abstimmung beziehungsweise einer Synchronisation zwischen den realen Montageabläufen und den datentechnischen Informationsverarbeitungsprozessen im DAS Informationssystem, um dem Werker situationspezifische Informationen zur Verfügung stellen zu können. Der Zeitpunkt der Informationsbereitstellung korreliert vor allem mit der kognitiven Belastung des Werkers. Je höher diese ist, desto höher ist das Risiko des Werkers, Fehler zu machen. Die Synchronität zwischen den realen Montageabläufen und den datenverarbeitenden Prozessen im DAS Informationssystem sind über Informationsrückmeldungen an das Informationssystem zu realisieren [12], [107]. Zur Generierung ausführungssynchroner Informationen sind entsprechende Daten mittels Sensoriken aufzunehmen.

Die in Tabelle 22 dargestellten Tendenzkennzahlen folgen der Annahme, dass sich mit steigender Produkt- sowie Arbeitsplatzkomplexität und der daraus resultierenden kognitiven Belastung des Werkers der grundsätzliche Bedarf einer Synchronisation zwischen den realen Montageabläufen und den datentechnischen Informationsverarbeitungsprozessen im DAS Informationssystem ergibt, da durch diese Synchronisation der Werker im Hinblick auf Fehlerfälle, mit welchen im Zuge steigender kognitiver Belastung zu rechnen ist, adäquat hingewiesen werden kann. Die Bestimmung der einzelnen Tendenzkennzahlen auf Basis einer MTM-UAS Analyse folgt in Analogie zur Darstellung in Kapitel 5.2.2.

Tabelle 22: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (eigene Darstellung)

Zeitpunkt der Informationsbereitstellung	Tendenzkennzahl				
	0 (keine Sensorik) ←-----binär-----→ 1 (Sensorik)				
Kognitive Werkerbelastung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Arbeitsplatzkomplexität	Tendenzkennzahl				
	sehr gering 1 – 0,9	gering 0,9 – 0,6	mittel 0,6 – 0,4	hoch 0,4 – 0,2	sehr hoch 0,2 - 0
Produktkomplexität	Tendenzkennzahl				
	sehr gering 0 – 2	gering 2 – 3	mittel 3 – 5	hoch 5 – 7	sehr hoch 7 – 9

5.2.6 Zugang zu der Werkerinformation

Der Beschreibungsparameter Zugang zu der Werkerinformation bezieht sich im Vergleich zum Beschreibungsparameter Mobilitätsgrad auf die Organisation der Montage und die darin verankerten Gestaltungsprinzipien [125]. Auf diese Weise werden arbeitsplatzspezifische DAS arbeitsgruppenspezifischen DAS gegenübergestellt. Hierbei ist vor allem die Kapazitäts-Flexibilität in den Wertschöpfungsfunktionen entlang der einzelnen Montagestationen entscheidend, welche in der Arbeitsvorbereitung im Falle einer Mixed-Model-Montage mittels eines multikriteriellen Line-Balancing zu bestimmen ist [126]. Der Beschreibungsparameter wird durch das Spannungsfeld der organisatorischen Gestaltung der Montage nach Prinzipien der Standplatzmontage und nach Prinzipien einer One-Piece-Flow-Montageorganisation (dem Grundprinzip einer Fließbandmontage folgend) bestimmt. Das Merkmal Zugang zu der Werkerinformation adressiert einmal mehr die Mobilität des Ausgabegerätes (Devices), auf welchem dem einzelnen Werker (mitarbeiterspezifisch) oder einer Werkergruppe (gruppenspezifisch) Informationen angezeigt werden.

Tabelle 23: Skalierung des Beschreibungsparameters Zugang zu der Werkerinformation (eigene Darstellung)

Zugang zu der Werkerinformation	Tendenzkennzahl		
	mitarbeiterspezifisch	3 - 4	gruppenspezifisch	0 - 2

Die Montage-Organisationsform One-Piece-Flow ist gegenüber der Karree-Montage eher mitarbeiterspezifisch, während die Karree-Montage eher gruppenspezifisch verläuft. Eine spezifische Darstellung der Montageprinzipien ist bei FELDMANN ET AL (2004) zu finden [125]. Die folgende Tabelle stellt die angenommenen Tendenzkennzahlen dar:

Tabelle 24: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter Zugang zur Werkerinformation (eigene Darstellung)

Montageorganisationsform	Tendenzkennzahl
One-Piece-Flow	mittel / hoch 3 – 4 (vgl. Mobilitätsgrad)
Karree-Montage	gering / mittel 0 – 2 (vgl. Mobilitätsgrad)

Das Montageprinzip ist nicht aus einer MTM-UAS Analyse ableitbar. Da der betrachtete Beschreibungsparameter mit dem Beschreibungsparameter Mobilitätsgrad korreliert, ist der Mobilitätsgrad im Falle einer One-Piece-Flow-Montage in aller Regel höher als im Falle einer Karree-Montage. Der Beschreibungsparameter Zugang zu der Werkerinformation wird in Analogie zum Mobilitätsgrad bestimmt. Eine Identifikation entsprechender Tendenzkennzahlen ist demnach auf Basis einer MTM-UAS Analyse möglich. Eine detaillierte Zuordnung der Tendenzkennzahlen zu den einzelnen Komponenten erfolgt im Anschluss an diesen Kapitelabschnitt.

5.2.7 Reale versus virtuelle Werkerinformation

Virtuelle Informationen sind computergenerierte Informationsformen. In diesem Zusammenhang wird in der wissenschaftlichen Literatur von Augmented Reality, Augmented Virtuality und Virtual Reality gesprochen. Die folgende Tabelle stellt deren Definitionen zusammenfassend dar.

Tabelle 25: Augmented Reality, Augmented Virtuality und Virtual Reality (eigene Darstellung)

Arten	Definition
Augmented Reality	In Augmented Reality (AR) wird das Sichtfeld des Benutzers mit situationsgerechten, computergenerierten Daten für die Echtzeit-Interaktion erweitert [97], [98].
Augmented Virtuality	Augmented Virtuality (AV) reichert die virtuelle Szene um reale Bilder an [127].
Virtual Reality	Die Virtual Reality (VR) ist eine simulierte Realität, in der der VR-Nutzer am Handeln und Steuern beteiligt ist und sich (idealerweise) in eine reale Umgebung integriert fühlt [128].

Da wissenschaftliche Arbeiten aufzeigen, dass im Bereich der Montage vor allem Formen der Augmented Reality zur Anwendung kommen [129], wird in dieser Arbeit auf die Formen der Augmented Virtuality und der Virtual Reality nicht näher eingegangen.

Virtuelle Informationen stehen realen Informationen gegenüber. Im Zusammenhang mit DAS bezeichnen reale Informationen im Gegensatz zu den Informationsrepräsentationsformen Augmented Reality einfachere Informationsdarstellungsformen, wie Signal-, Text-, Bild-, Animations-, Video- oder auch Sprachinformationen. Diese Formen der Informationsdarstellung sind weniger komplex und benötigen weniger datentechnische Verarbeitungsleistung [29]. Das Ausmaß der Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität wirkt sich unmittelbar auf den Werker aus, weil mit einem deutlich höheren Komplexitätsgrad der Tätigkeitsausführung eine höhere kognitive Belastungen einhergeht

(vgl. Kapitel 2.1). Es wird der Annahme gefolgt, dass je informationshaltiger sowie je zeit- und ortsunabhängiger eine Informationsrepräsentationsform ist, desto stärker ist der positive Einfluss der Information auf die Wirtschaftlichkeit und Produktivität des Werkers. Diese Annahme folgt Studienergebnissen von JESKE (2014) [33]. Im Anhang in Tabelle 86 erfolgt eine Beschreibung und Darstellung der unterschiedlichen Informationsrepräsentationsformen im Hinblick auf deren Informationsgehalt in aufsteigender Reihenfolge.

Tabelle 26: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter reale versus virtuelle Werkerinformationen (eigene Darstellung)

Reale versus virtuelle Werkerinformation	Tendenzkennzahl				
	reale Werkerinformation ←-----→ virtuelle Werkerinformation				
Kognitive Werkerbelastung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Arbeitsplatzkomplexität	Tendenzkennzahl				
	sehr gering 1 – 0,9	gering 0,9 – 0,6	mittel 0,6 – 0,4	hoch 0,4 – 0,2	sehr hoch 0,2 – 0
Produktkomplexität	Tendenzkennzahl				
	sehr gering 0 – 2	gering 2 – 3	mittel 3 – 5	hoch 5 – 7	sehr hoch 7 – 9

Die Tendenzkennzahlen folgen der Annahme, dass mit steigender Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität eine mit mehr Inhalten angereicherte Informationsrepräsentationsform für den Werker im Zuge einer wirtschaftlichkeits- und produktivitätserhaltenden und -fördernden Tätigkeitsausführung von Nöten ist. Die Bestimmung der einzelnen Tendenzkennzahlen auf Basis einer MTM-UAS Analyse folgt in Analogie der Darstellung in Kapitel 5.2.2.

5.2.8 Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation

Ability to Dialog adressiert Dialogtätigkeiten des Werkers im Zuge der Durchführung seiner Tätigkeit und die Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen mit dem DAS Informationssystem. Konkret werden mit dem Beschreibungsparameter vor allem administrative, protokollierende oder auch buchende Tätigkeiten bezeichnet. Darunter fällt beispielsweise das Dokumentieren von ausgeführten Tätigkeitsschritten oder das Protokollieren von qualitätssichernden Daten. Diese Tätigkeiten sind vom Werker in Bezug auf Vorgaben entweder durchzuführen oder nicht, was durch die Arbeitsbeschreibung dargestellt ist. Folgerichtig sind diese Arten der Tätigkeiten direkt aus einer MTM-UAS Analyse ableitbar.

Gemäß der Taxonomie von MTM-UAS sind hier zum einen Tätigkeiten identifizierbar, welche mit einem Hilfsmittel durchgeführt werden oder mit einem spezifischen Werkzeug. Zur Identifikation einer solchen Tätigkeitsausführung besteht die Möglichkeit, den MTM-UAS den Prozessbaustein EH zu identifizieren [86].

Eindeutiger identifizierbar ist eine solche Tätigkeit mittels der MTM-UAS-Aufbaustufen [86], welche Schraubarbeiten, das Montieren von Normteilen, Behandeln, Prüfen und Messen, Markieren, Festspannen und Lösen, Auspacken, Kleben und das Montieren von elektronischen Leistungen standardmäßig umfassen. Die entsprechende Codierung der MTM-UAS-Prozessbausteine liefert für diese Tätigkeiten grundsätzliche Aussagen zu den verwendeten Werkzeugen. Durch eine erweiterte MTM-UAS Darstellung, welche eine spezifische Information zu der Art beziehungsweise zu dem Typ des zu verwendenden Hilfsmittels anführt, ist dies mit einer Datenanalyse eindeutig identifizierbar. Im Anhang bietet Tabelle 87 einen Überblick über die entsprechenden MTM-UAS Aufbaustufen, welche eine Tätigkeitsausführung unter Verwendung eines Werkzeuges darstellen [86]. Ergänzend sind die MTM-UAS Logistikprozessbausteine anzuführen, welche bei BOKRANZ ET AL. (2012) nachzulesen sind [86].

Zur Identifikation dokumentierender oder protokollierender Tätigkeiten sind die MTM-UAS Prozessbausteine im System „Informationen verarbeiten“ durch eine entsprechende Datenanalyse zu betrachten. Die entsprechenden MTM-UAS Prozessbausteine sind in Tabelle 43 und in Tabelle 44 dargestellt. Wird in der Methodenbeschreibung einer der aufgeführten MTM-UAS Prozessbausteine im Kontext der Verwendung eines Werkzeuges oder im Kontext einer dokumentierenden oder protokollierenden Tätigkeit angeführt, wird eine entsprechende Tendenzkennzahl gesetzt (hier 1). Die folgende Tabelle verdeutlicht die Zuordnung der gebildeten Tendenzkennzahlen. Zum einen im Hinblick auf die Verwendung eines Werkzeuges und zum anderen im Hinblick auf dokumentierende oder protokollierende Tätigkeiten, welche auf der einen Seite bei Verwendung eines Werkzeuges in Interaktion mit dem DAS Informationssystem oder im Falle von dokumentierenden oder protokollierenden Tätigkeiten über Sensorsysteme in Interaktion mit dem DAS Informationssystem stehen.

Tabelle 27: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (eigene Darstellung)

Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation	Tendenzkennzahl
	0 (keine Dialogführung) ←-----binär-----→ 1 (Dialogführung)

5.2.9 Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen

Ability to Interact with other Tools stellt einen weiteren Beschreibungsparameter DAS dar, welcher auf die Einstellung (Parametrisierung) von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen eingeht. Konkret sind mit dem Beschreibungsparameter vor allem parametrisierende, konfigurierende oder einstellende Tätigkeiten von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen gemeint, wie das Konfigurieren von Schraubsystemen, oder das Programmieren von Steuerungscode für Robotik-Systeme.

Wird in einer Tätigkeitsausführung beziehungsweise in einer entsprechenden Arbeitsmethode eine parametrisierende Tätigkeit identifiziert, wird eine entsprechende Tendenzkennzahl gesetzt (hier 1). Die Identifikation erfolgt entsprechend einer Datenanalyse der Arbeitsmethodenbeschreibung unter Berücksichtigung der Verwendung von Werkzeugen in der Tätigkeitsausführung, wie in Tabelle 46 und Tabelle 87 im Anhang dargestellt. Die Tabelle 28 verdeutlicht die Zuordnung der auf diese Weise gebildeten Tendenzkennzahlen entlang der entwickelten Morphologie (vgl. im Anhang Abbildung 52).

Tabelle 28: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter Möglichkeit der Interaktion (eigene Darstellung)

Möglichkeit der Interaktion	Tendenzkennzahl
	0 (keine Interaktion) ←-----binär-----→ 1(Interaktion)

5.2.10 Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit des Systems

Der Beschreibungsparameter Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit beschreibt die Usability und User Experience [130] eines Systems. Dabei spielt die Gebrauchstauglichkeit eine zentrale Rolle. Diese bezeichnet nach DIN EN ISO 9241-11 [131] das Ausmaß, in dem ein Produkt, System oder Dienst durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Anwendungskontext genutzt wird, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen. Die Gebrauchstauglichkeit bezieht sich im Rahmen einer standardisierten Betrachtung auf hinreichend objektivierbare Tatbestände. Eine anwendungsorientierte Methode zur Betrachtung dieser Tatbestände stellt die sogenannte System Usability Scale (SUS) dar. SUS umfasst zehn Fragen nach einer Likert-Skala [115]. Die Gebrauchstauglichkeit der betrachteten technischen DAS Komponenten steht demnach in direkter Abhängigkeit von Menschen, der Akzeptanz von einzelnen Technologien, mit denen eine Interaktion ausgeführt wird, sowie von seiner Motivation in Bezug auf die Bedienung. Darüber hinaus steht sie in Abhängigkeit von der zu assistierenden Tätigkeit und ihren informativen Anforderungen. In Anlehnung

an SUS wird folgende Skala im Zuge einer Bestimmung von Tendenzkennzahlen zur Identifikation der mit dem Beschreibungsparameter korrelierenden Komponenten in Bezug auf Akzeptanz und Motivation des Werkers angenommen.

Tabelle 29: Tendenzkennzahlen zum Beschreibungsparameter
Akzeptanz und Motivation des Mitarbeiters (eigene Darstellung)

Tendenzkennzahlen	Beschreibung
0	Sehr hohe Akzeptanz und Motivation zur Nutzung des DAS, beziehungsweise zur Interaktion mit den Komponenten.
1	Hohe Akzeptanz und Motivation zur Nutzung des DAS, beziehungsweise zur Interaktion mit den Komponenten.
2	Mittlere Akzeptanz und Motivation zur Nutzung des DAS, beziehungsweise zur Interaktion mit den Komponenten.
3	Geringe Akzeptanz und Motivation zur Nutzung des DAS, beziehungsweise zur Interaktion mit den Komponenten.
4	Sehr geringe Akzeptanz und Motivation zur Nutzung des DAS, beziehungsweise zur Interaktion mit den Komponenten.

Akzeptanz und Motivation bezüglich einzelner technischer DAS Komponenten sind werkerindividuell. Globalaussagen auf der Basis wissenschaftlich fundierter Studien zu einzelnen Komponenten sind unter anderem auf Grund der Tatsache nicht möglich, dass DAS gegenwärtig erst Einzug in viele Industrieunternehmen halten. Gegenwärtig sind lediglich einzelne Aspekte DAS mittels Studien analysiert worden. Daher wird an dieser Stelle der Annahme gefolgt, dass jede Komponente, mit welcher der Werker in direkter Interaktion steht, die Tendenzkennzahlen 0 bis 4 zuordenbar sind. Tabelle 29 verdeutlicht diese Zuordnung. Die Tendenzkennzahlen sind auf Basis einer MTM-UAS-Analyse¹⁰ nicht identifizierbar. Die Bestimmung der entsprechenden Tendenzkennzahl ist vor diesem Hintergrund stets individuell vom Werker oder vom Montageteam vorzunehmen. Eine detaillierte Zuordnung der Tendenzkennzahlen zu den einzelnen Komponenten erfolgt im Anschluss an diesen Kapitelabschnitt.

¹⁰ MTM-UAS (MTM Universelles Analysier-System) ist ein verdichtetes Verfahren, das die Grundbewegungselemente aus MTM-1 zusammenfasst und eine schnelle und häufig ausreichend genaue Analyse von Arbeitsabläufen ermöglicht [86].

5.3 Einflüsse der Beschreibungsparameter auf Komponenten DAS

In diesem Kapitelabschnitt erfolgt eine Zuordnung der gebildeten Tendenzkennzahlen (vgl. Kapitel 5.2) zu den einzelnen Komponenten DAS, bezugnehmend auf die gebildeten Technologie-Pools in Form tabellarischer Regelwerke.

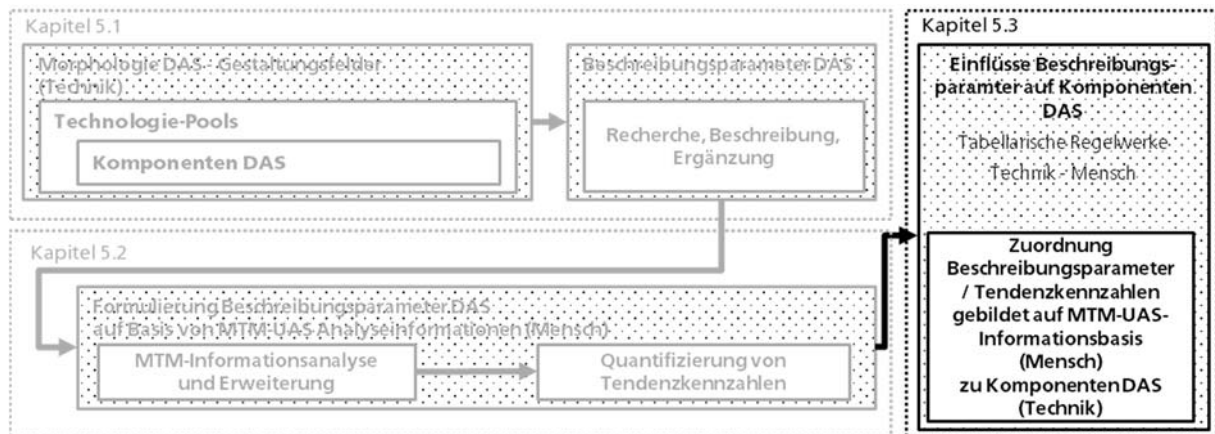


Abbildung 19: Einordnung Regelwerk (Technik – Mensch) (eigene Darstellung)

In Bezug auf eine Zuordnung des Komponenten des T-Pools sind die Beschreibungsparameter Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation und Möglichkeit der Interaktion anzuwenden, wie in Kapitel 5.2.8 und in Kapitel 5.2.9 beschreiben. Je nach auszuführender Tätigkeitsaufgabe gibt es einen Bedarf oder keinen Bedarf an Dialogführung / Dokumentation oder Interaktion mit DAS verknüpften technischen Hilfs-, Betriebsmitteln oder Werkzeugen. Eine Zuordnung unterschiedlicher Tendenzkennzahlen ist in Tabelle 30 bezogen auf die einzelnen Beschreibungsparameter dargestellt.

Tabelle 30: Regelwerk – Beschreibungsparameter / Tendenzkennzahlen zum T-Pool (eigene Darstellung)

Bez.	Komponente	Möglichkeit der Dialogführung binär [nein = 0, ja = 1]	Möglichkeit der Interaktion binär [nein = 0, ja = 1]	Benutzer- und Gebrauchsfreundlich likert [0 – 4]
T ₁	Schraubsysteme	[0, 1]	[0, 1]	[0 – 4]*
T ₂	Mess- und Prüfsysteme	[0, 1]	[0, 1]	[0 – 4]*
T ₃	Markiersysteme	[0, 1]	[0, 1]	[0 – 4]*
T ₄	Festspannsysteme (Vorrichtungen)	[0, 1]	[0, 1]	[0 – 4]*
T ₅	Robotik-Systeme	[0, 1]	[0, 1]	[0 – 4]*
T ₆	Klebesysteme	[0, 1]	[0, 1]	[0 – 4]*

* abhängig vom individuellen Werker

Zur Zuordnung von Komponenten des D-Pools sind die Beschreibungsparameter Mobilitätsgrad, Zugang zu der Werkerinformation, Benutzerfreundlichkeit des Systems zu

beachten, wie in Kapitel 5.2.1, 5.2.6 und 5.2.10 beschreiben. Die Zuordnung unterschiedlicher Tendenzkennzahlen ist in Tabelle 31 bezogen auf die entsprechenden Beschreibungparameter abgebildet.

Tabelle 31: Regelwerk – Beschreibungparameter und Tendenzkennzahlen zum D-Pools
(eigene Darstellung)

Bez.	Komponente	Mobilitätsgrad, likert [0 – 4]	Zugang zur Werkerinformation, likert [0 – 4]	Benutzer- und Gebrauchsfreundlich likert [0 – 4]
D ₁	Screen	[0 – 1]	[3 – 4]	[0 – 4]*
D ₂	Touch Screen	[0 – 1]	[3 – 4]	[0 – 4]*
D ₃	Tablet	[0 – 2]	[2 – 3]	[0 – 4]*
D ₄	Glass	[2 – 4]	[0 – 2]	[0 – 4]*
D ₅	Projektion	[0 – 2]	[3 – 4]	[0 – 4]*
D ₆	Lichtsignale / Signal	[0 – 1]	[3 – 4]	[0 – 4]*
D ₇	Sprachausgabe	[2 – 4]	[3 – 4]	[0 – 4]*
D ₈	Lasersignale	[0 – 2]	[3 – 4]	[0 – 4]*

* abhängig vom individuellen Werker

Eine Zuordnung von Komponenten des TS-Pools erfolgt auf Basis des Beschreibungsparameters Zeitpunkt der Informationsbereitstellung, welcher mit der beim Werker auftretenden kognitiven Belastung bestimmbar ist und in Kapitel 5.2.5 und 5.2.10 beschreiben wird. Die Zuordnung der unterschiedlichen Tendenzkennzahlen ist in Tabelle 32, bezogen auf die entsprechenden Beschreibungparameter, abgebildet.

Tabelle 32: Regelwerk – Beschreibungparameter und Tendenzkennzahlen zum TS-Pools
(eigene Darstellung)

Bez.	Komponente	Arbeitsplatzkomplexität = A, likert [0 – 1]	Produktkomplexität = B, likert [0 – 9]	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung	Benutzer- und Gebrauchsfreundlich likert [0 – 4]
TS ₁	Spracheingabe	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₂	Druckknopf	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₃	Näherungsschalter	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₄	Barcode (manuelles Scannen)	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₅	Barcode (automatisches Scannen)	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₆	RFID (manuelles Einlesen)	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₇	RFID (automatisches Einlesen)	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₈	Hand Local Positioning Sensoriken	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₉	Tool Local Positioning Sensoriken	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*
TS ₁₀	Steuerungssignaltrigger (SPS/PLC)	in Abhängigkeit von T-Pool			
TS ₁₁	Kamera- / Gestikerkennung	[0 – 1]	[0 – 9]	wenn A oder B > 0	[0 – 4]*

* abhängig vom individuellen Werker

Durch die Beschreibungparameter kognitive Werkerbelastung, reale versus virtuelle Information und Benutzerfreundlichkeit des Systems, wie in Kapitel 5.2.7 und 5.2.10 beschreiben, erfolgt eine Zuordnung der Komponenten des IR-Pools. Die Zuordnung der unterschiedlichen Tendenzkennzahlen ist in Tabelle 33 bezogen auf die entsprechenden Beschreibungparameter abgebildet.

Tabelle 33: Regelwerk – Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen zum IR-Pools
(eigene Darstellung)

Bez.	Komponente	Kognitive Werkerbelastung (vgl. Tabelle 32)	Reale vs. virtuelle Information likert [0 – 9]	Benutzer- und Gebrauchs- freundlichkeit likert [0 – 4]
IR ₁	Signal	wenn A oder B >0	[0 – 2]	[0 – 4]*
IR ₂	Textinformationen	wenn A oder B >0	[1 – 3]	[0 – 4]*
IR ₃	Bilder	wenn A oder B >0	[2 – 4]	[0 – 4]*
IR ₄	Animationen	wenn A oder B >0	[3 – 5]	[0 – 4]*
IR ₅	Videos	wenn A oder B >0	[5 – 7]	[0 – 4]*
IR ₆	Spracheingabe	wenn A oder B >0	[9 – 7]	[0 – 4]*
IR ₇	Augmented Reality	wenn A oder B >0	[6 – 9]	[0 – 4]*
IR ₈	Steuerungsbefehle für Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge		in Abhängigkeit von T-Pool	
* abhängig vom individuellen Werker				

Die Komponenten des II-Pools sind durch die absolute Anzahl der zu betrachtenden Produkte und der absoluten Anzahl der zu betrachtenden Produktvarianten, wie in Kapitel 5.2.4 beschreiben, gekennzeichnet. Die Zuordnung der Tendenzkennzahlen ist in Tabelle 34 entsprechend den Beschreibungsparametern abgebildet.

Tabelle 34: Regelwerk – Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen zum II-Pools
(eigene Darstellung)

Bez.	Komponente	Anzahl Produkte, likert [0–5]	Anzahl Produktvari- anten, likert [0–10]
II ₁	Manuelle Konfiguration	[1 – 2]	[1 – 2]
II ₂	Verbindung mit Kontrollsystem (ERP-/ME-System)	[2 – 5]	[2 – 10]
II ₃	Produkt (datengesteuert über CAD)	>5	>10

5.4 Zusammenfassung

Das Kapitel zeigt auf, dass kein holistisches digitales Assistenzsystem existiert. Vielmehr bestehen digitale Assistenzsysteme aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten, welche in verschiedenen Abhängigkeiten zueinanderstehen.

Vor dem Hintergrund, dass kontinuierlich neue Komponenten digitaler Assistenzsysteme zugänglich gemacht werden und festgestellt wird, dass verschiedene, einst im Consumer-Bereich genutzte Komponenten auch einen Mehrwert im Industrieinsatz erbringen, zeigt dieses Kapitel eine Morphologie digitaler Assistenzsysteme auf und fasst die Komponenten in Technologie-Pools zusammen. Diese sind ergänzbar.

Durch die Morphologie (vgl. Abbildung 52 im Anhang) und die Bildung der Technologie-Pools (vgl. Tabelle 10 - Tabelle 15) ist es möglich,

- (1) Komponenten digitaler Assistenzsysteme strukturiert darzustellen, sowie

- (2) zu dem Problem der Bestimmung eines wirtschaftlichkeits- und menschengerechten Designs eine Gesamtheit aller denkbaren, technisch möglichen Lösungen aufzuzeigen.

Der Aufbau der Morphologie folgt den Gestaltungsfeldern digitaler Assistenzsysteme und der Struktur Informationstyp, Informationsmenge, Informationswahrnehmung, Informationseingabeformen und Informationsausgabeformen, Informationsintensität, Informationsquellen sowie Ein- und Ausgabegeräten [31] (vgl. Kapitel 5.1.1). Durch Zuordnung von quantifizierbaren Tendenzkennzahlen, abgeleitet aus den Beschreibungsparametern, ist es gelungen, jede einzelne Komponente digitaler Assistenzsysteme in Bezug detailliert zu adressieren. Hierbei besteht bei einem großen Teil aller Tendenzkennzahlen die Möglichkeit einer Quantifizierung auf Basis einer MTM-UAS-Analyse und deren indirekten und direkten enthaltenen Informationen. Bei Tendenzkennzahlen, welche nicht auf Basis einer MTM-UAS-Analyse quantifizierbar sind, wurden ergänzende Informationsanforderungen ermittelt (erweiterte MTM-UAS Analyse).



Abbildung 20: Zuordnung Komponenten DAS auf Basis von MTM (eigene Darstellung)

Die entsprechenden Zuordnungen sind regelwerkbasiert zusammengefasst in Tabelle 30 - Tabelle 34. Da die Methode MTM jedoch ausschließlich einen durchschnittlichen Menschen mit einem durchschnittlichen Leistungsniveau betrachtet [86], wird im folgenden Kapitel der Mensch mit seinen Eigenschaften und Merkmalen genauer betrachtet.

Dabei gilt es, Erkenntnisse zu gewinnen,

- (1) welche menschlichen Faktoren in einem direkten Zusammenhang mit den organisatorischen Zielsetzungen von Industrieunternehmen für die Verwendung DAS stehen und
- (2) Rückschlüsse zuzulassen, wie menschliche Leistung mit der Interaktion von Komponenten DAS in Verbindung steht, wodurch die Schnittmenge Mensch-Organisation des MTO-Konzepts verfolgt wird.

6 Menschliche Faktoren digitaler Assistenzsysteme

Der Mensch steht mit seinen individuellen Eigenschaften und Merkmalen in direkter Verbindung mit unternehmensorganisatorischen Zielsetzungen DAS. Die Intensität der Interaktion mit einem DAS wird vom Menschen bestimmt. Das Kapitel adressiert die Schnittmenge Mensch-Organisation des MTO-Konzeptes. Vor diesem Hintergrund gilt es, menschliche und organisatorische Zielsetzungen, welche in Verbindung mit den Komponenten DAS stehen, bei der Planung und Evaluierung von DAS adäquat zu berücksichtigen. Es gilt, auf der einen Seite menschliche Beschreibungsparameter in Bezug auf die Arbeitsperson zu identifizieren und Einflüsse auf die Zielsetzungen von Industrieunternehmen für die Verwendung DAS zu identifizieren und schließlich diese mit entsprechenden Komponenten DAS zu verbinden, mit welchen der Mensch interagiert. Auf der anderen Seite gilt es, die Komponenten eines DAS im Sinne der unternehmensorganisatorischen Zielsetzungen für die Verwendung DAS auszuwählen, so dass der Mensch in bestimmten Anwendungsfällen mit diesen Komponenten effektiv, effizient und zufriedenstellend interagiert. Auf diese Art wird der Mensch eine adäquate Unterstützung erhalten. Vor diesem Hintergrund erfolgt in diesem Kapitel zunächst eine Identifikation von Eigenschaften und Merkmalen des Menschen in Form von Beschreibungsparametern sowie anschließend eine Analyse zur quantifizierten Bestimmung dieser Beschreibungsparameter. Darauf aufbauend erfolgt eine Identifikation der Einflüsse dieser Beschreibungsparameter auf die Zielsetzungen DAS sowie eine Analyse und Darstellung der Komponenten DAS, welche im Zuge der Interaktion einen direkten Einfluss auf den Menschen ausüben. Abbildung 21 stellt den strukturellen Aufbau des Kapitels dar.

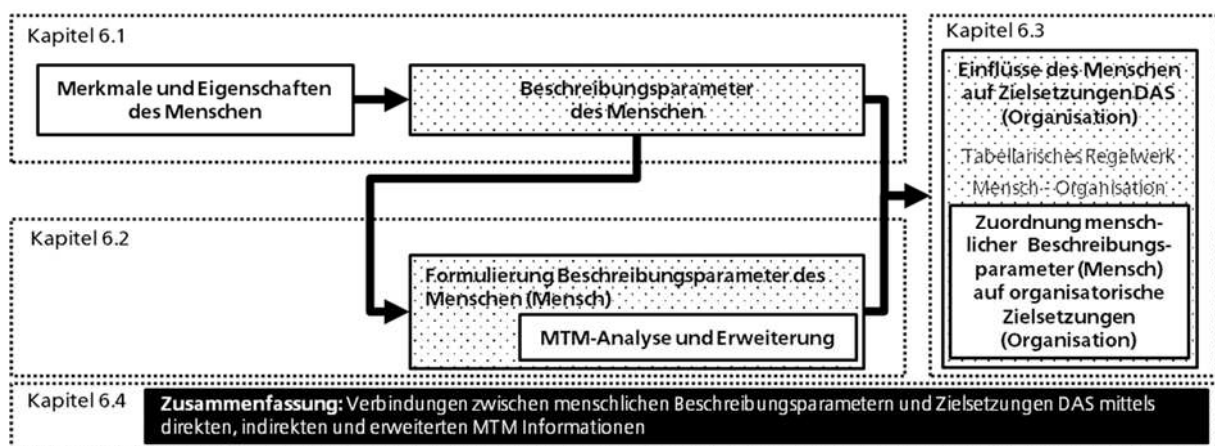


Abbildung 21: Struktureller Aufbau des Kapitels 6 (eigene Darstellung)

6.1 Beschreibungsparameter des Menschen

Im Folgenden werden menschliche Merkmale und Eigenschaften sowie darauf aufbauend menschliche Bestimmungsgrößen (hier: Beschreibungsparameter des Menschen) identifiziert.

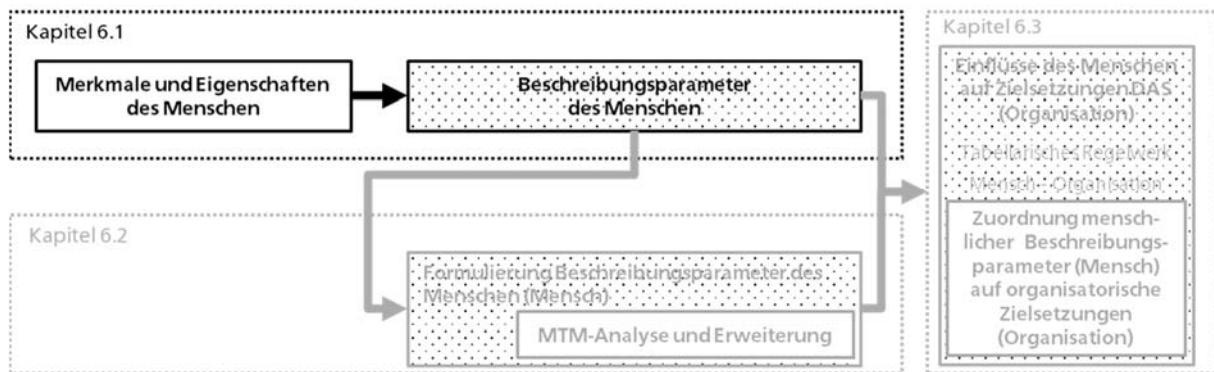


Abbildung 22: Einordnung Beschreibungsparameter der Menschen (eigene Darstellung)

Menschliche Eigenschaften beziehen sich sowohl auf die individuelle Konstitution und Disposition als auch auf menschliche Qualifikation und Kompetenz. Unter Konstitutionsmerkmalen werden Eigenschaften des Menschen zusammengefasst, welche im menschlichen Lebenszyklus unveränderbar sind, wie Geschlecht, Körperbau, Kulturkreis und Erbanlagen. Dispositionsmerkmale bezeichnen Eigenschaften des Menschen, welche im Zeitverlauf recht stabil sind, sich aber verändern können, jedoch ohne, dass der Mensch selbst darauf direkten Einfluss nehmen kann. Unter Dispositionsmerkmalen werden menschliche Eigenschaften zusammengefasst, wie beispielsweise Persönlichkeit, Alter, Intelligenz, Körpergewicht, Gesundheitszustand und rhythmologische Einflüsse. Anpassungsmerkmale beziehen sich auf menschliche Eigenschaften, welche als Reaktion auf energetisch-effektorische, informatorisch-mentale sowie auf emotionale Belastungen der Arbeit beschrieben werden. Hier sind folgende Eigenschaften des Menschen anzuführen: Beanspruchung, Ermüdung, Motivation, Zufriedenheit und Stimmung. Qualifikations- und Kompetenzmerkmale fassen Eigenschaften des Menschen zusammen, welche vor allem aus Lernprozessen resultieren und kurz-, mittel- und langfristig veränderbar sind. Unter Qualifikations- und Kompetenzmerkmalen werden Erfahrung, Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Bildung und Kompetenz des Menschen verstanden [23]. Da die Merkmale unterschiedliche Wirkungsrichtungen und -stärken in Bezug auf eine zu erbringende Leistung haben, also leistungssteigernd oder -mindernd wirken können, sind sie ganzheitlich und ineinandergreifend bei der Planung und Evaluierung DAS zu betrachten (vgl. Abbildung 23).



Abbildung 23: Merkmale des Menschen und Bestimmungsgrößen menschlicher Arbeit [23]

Qualifikation wird vom Bildungssystem beeinflusst und bezieht sich auf die vermittelten Inhalte, die von der Arbeitsperson im Arbeitssystem verlangt werden. Qualifikation berücksichtigt kaum individuelle Merkmale und spiegelt somit die objektive Seite des Könnens und Wissens wider. Der Begriff der Qualifikation wird meist im Zusammenhang mit betrieblichen Arbeitsprozessen verwendet und stellt das Gegenstück zu den Tätigkeitsanforderungen in einem Arbeitssystem dar.

Im Gegensatz dazu bezieht sich Kompetenz auf das Handeln nach individuellen Zielen und subjektiven Leistungsvoraussetzungen. Kompetenz berücksichtigt neben den verfügbaren Fähigkeiten und Fertigkeiten auch den Willen und die Motivation zur Ausübung einer Tätigkeit. Sie ist subjektzentriert, das heißt, sie bezieht sich immer auf die Person, die über die Kompetenz verfügt oder diese erwerben soll. Kompetenz umfasst die Selbstorganisations-, Handlungs-, und Persönlichkeitsdisposition einer Arbeitsperson. Die Gesamtheit der Merkmale eines Menschen bestimmt, ob die Person für die Arbeitsaufgabe geeignet ist, wie sie ausgebildet werden muss und wie die Arbeit gestaltet sein soll, um eine gewünschte Arbeitsleistung sicherzustellen.

Unter Arbeitsleistung wird das auf die Zeiteinheit bezogene Arbeitsergebnis eines Arbeitssystems verstanden. Die Leistung, die von Arbeitspersonen erbracht werden kann, ist sowohl interindividuellen, das heißt, zwischen verschiedenen Personen zu unterscheidenden, als auch intraindividuellen Schwankungen ausgesetzt. Interindividuelle Schwankungen können durch Übungsgrad oder Gesundheitszustand verur-

sacht werden [86]. Das Leistungsvermögen einer Person setzt sich aus Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft zusammen. Leistungsfähigkeit gilt als Ausführungsregulation bei der Bewältigung einer Handlung und bezeichnet alle Merkmale, die physiologisch als Leistungskapazität und psychologisch als Leistungspotenz das Leistungsgefüge einer Person darstellen. Leistungsfähigkeit entspricht der theoretisch maximalen Kapazität eines Menschen, über die er verfügen kann. Unter Leistungsbereitschaft versteht man das Ausmaß der Leistungsabgabe bei unterschiedlichen internen und externen Faktoren. Die Leistungsbereitschaft hängt sowohl von der physiologischen als auch von der psychologischen Leistungsbereitschaft (Leistungsmotivation) ab. Die physiologische Leistungsbereitschaft hängt von tages- und jahreszeitlichen Veränderungen und physikalischen Umgebungsfaktoren ab, während sich die psychologische Leistungsbereitschaft auf die Einstellung zur Arbeit bezieht. Leistungsmotivation ist von inneren Einstellungen und äußeren Bedingungen abhängig und nicht bei der Geburt vorgegeben. Die Leistungsbereitschaft ist eine notwendige Voraussetzung, aber keine hinreichende Bedingung, um Potenziale der Leistungsfähigkeit auszuschöpfen [86]. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 24 verdeutlicht.

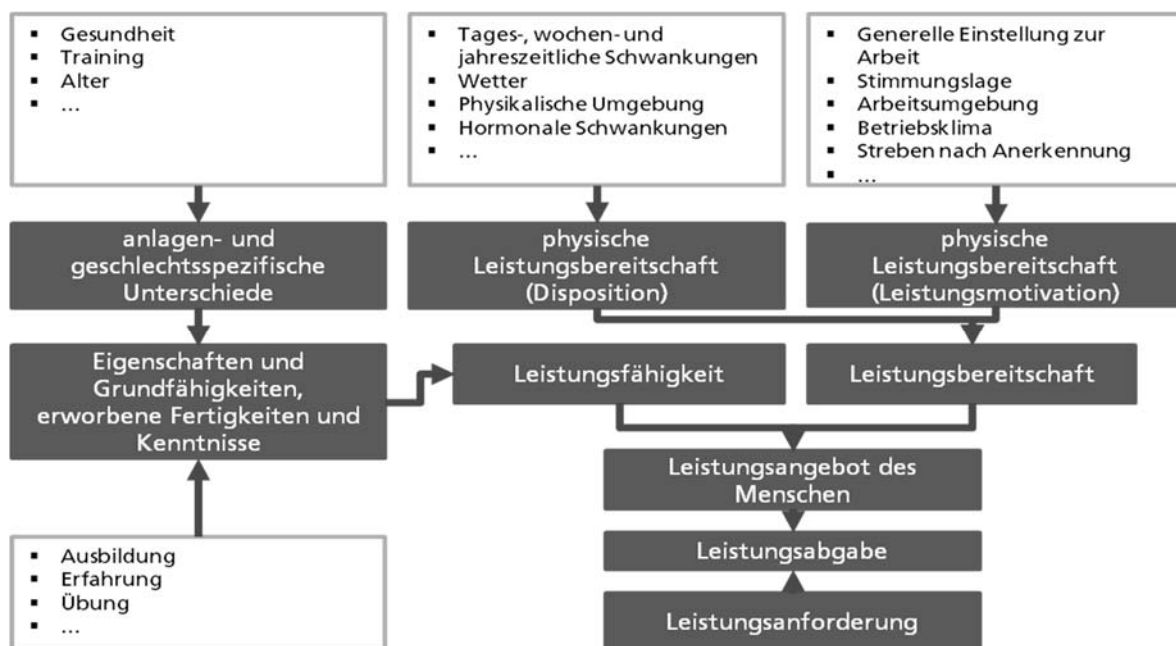


Abbildung 24: Zusammensetzung des menschlichen Leistungsangebots [86]

Abbildung 24 verdeutlicht, dass sich das Leistungsangebot des Menschen sowohl aus der menschlichen Leistungsfähigkeit und der menschlichen Leistungsbereitschaft zusammensetzt als auch, dass die aus dem Leistungsangebot des Menschen ausgehende Leistungsabgabe von den Leistungsanforderungen der Tätigkeitsausübung determiniert wird.

Die Verbindung zwischen Arbeit, Technik und Mensch wird als Ergonomie bezeichnet. Sie beschäftigt sich mit den spezifischen Wechselwirkungen zwischen Menschen und anderen arbeitswissenschaftlichen Systemelementen. Das Ziel der Ergonomie ist es, das Wohlbefinden des Menschen und das Gesamtsystem („Arbeit“) zu optimieren. Dabei stellt die Ergonomie ganzheitliche eine Arbeitssystem-Gestaltung¹¹ in den Mittelpunkt. Es gilt dabei, effiziente und produktive Arbeitsprozesse zu entwickeln, welche die Entwicklung der Persönlichkeit und die Gesundheit der arbeitenden Menschen unterstützen. Als Ziel der Gestaltung von Arbeitssystemen gilt die Optimierung der Arbeitsbeanspruchung, die Vermeidung beeinträchtigender Einflüsse und die Förderung erleichternder Einflüsse. Dadurch wird nicht nur der Mensch geschont, sondern auch die Effizienz des Systems verbessert.

Dabei fließen in die ganzheitliche (ergonomische) Arbeitssystem-Gestaltung Erkenntnisse aus folgenden Teildisziplinen, welche bei BOKRANZ und LANDAU (2012) im Detail nachzulesen sind, ein [86]:

- Anthropometrische Arbeitsgestaltung
- Bewegungstechnische Arbeitsgestaltung
- Gestaltung der Arbeitsumgebung
- Informatrische Arbeitsgestaltung
- Organisatorische Arbeitsgestaltung
- Physiologische Arbeitsgestaltung
- Psychologische Arbeitsgestaltung
- Sicherheitstechnische Arbeitsgestaltung

Bei der Arbeitssystem-Gestaltung sind vor allem jene Merkmale der Arbeit (Arbeitsfaktoren) entscheidend, die Einfluss auf die oben genannten Aspekte nehmen [86]:

- Aufgaben der Arbeitsperson
- Belastungen
- Gefährdungen
- Kooperation, Kommunikation und Kompetenz

Die Ausprägungen dieser Arbeitsfaktoren ergeben sich aus den Arbeitsbedingungen. Diese lassen sich in vier Hauptgruppen unterteilen [86]:

¹¹ Die ganzheitliche (ergonomische) Arbeitssystem-Gestaltung ist die systematische Planung und Gestaltung bzw. Veränderung von technischen, organisatorischen und sozialen Arbeitsbedingungen mit dem Ziel, diese an die Leistungsvoraussetzungen des Menschen anzupassen [86], [132].

- Technische Arbeitsbedingungen ergeben sich aus Arbeitsobjekt, Technologie, Arbeitsmitteln, Arbeitsplatz, Arbeitsumgebung und persönlichen Schutzmitteln.
- Zu organisatorischen und arbeitswissenschaftlichen Arbeitsbedingungen zählen Arbeitsinhalt, Arbeitsmethode, Ausbildung, Arbeitsdauer und Entlohnungsgrundsatz.
- Die psychisch-sozialen Arbeitsbedingungen bestehen aus psychosozialen Betriebsklima, Mitbestimmung, Unternehmensimage, Berufsimago und aus sozialer Sicherheit.
- Zu den materiell-finanziellen Arbeitsbedingungen gehören Entlohnungshöhe und andere Arbeitsentgelte.

Um die Auswirkungen der Arbeitsfaktoren und Arbeitsbedingungen optimierend aufeinander abstimmen zu können, wird ein entsprechendes Modell zur Analyse der vorliegenden Tätigkeitsbedingungen benötigt. Das Belastungs-/ Beanspruchungskonzept nach ROHMERT und MARTIN bietet einen solchen Ansatz [133], welches in Abbildung 25 dargestellt ist.

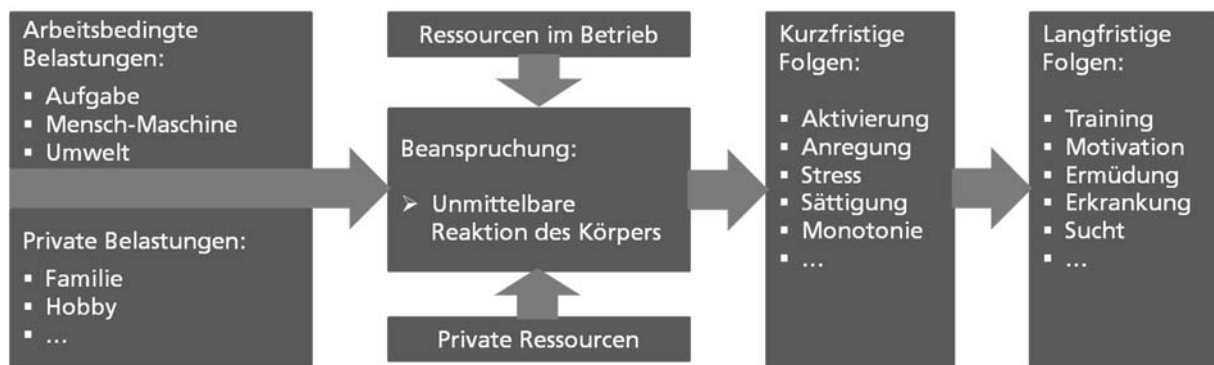


Abbildung 25: Belastungs-/ Beanspruchungskonzept [133]

Zusammenfassend sind folgende menschliche Beschreibungsparameter festzuhalten:

Tabelle 35: Menschliche Beschreibungsparameter [134]

Merkmale	Beschreibungsparameter Mensch
Konstitutionsmerkmale	Geschlecht, Körperbau, Kulturkreis, Erbanlage
Dispositionsmerkmale	Persönlichkeit, Alter, Intelligenz, Körpergewicht, Gesundheitszustand, rhythmologische Einflüsse
Anpassungsmerkmale	Erfahrung, Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Bildung, Kompetenz
Qualifikations- und Kompetenzmerkmale	Beanspruchung, Ermüdung, Motivation, Zufriedenheit, Stimmung

6.2 Formulierung der Beschreibungsparameter Mensch

In diesem Kapitelabschnitt werden die oben dargestellte menschliche Beschreibungsparameter dem Versuch einer Formulierung unterzogen.

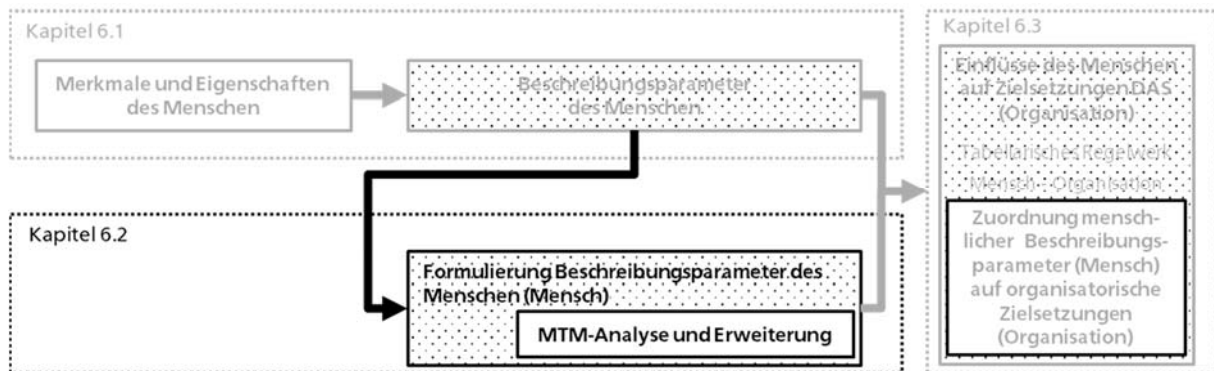


Abbildung 26: Einordnung der Formulierung der Beschreibungsparameter des Menschen (eigene Darstellung)

Während die Konstitutionsmerkmale des Menschen (Geschlecht, Körperbau, Kulturkreis und Erbanlagen) im Wesentlichen eindeutig bestimmbar und quantifizierbar sind, können die Dispositionsmerkmale des Menschen (Persönlichkeit, Alter, Intelligenz, Körpergewicht, Gesundheitszustand sowie rhythmologische Einflüsse) nur teilweise bestimmt und quantifiziert werden. Vor allem Bestimmungsgrößen wie Persönlichkeit und Intelligenz sind schwer zu quantifizieren, das gilt auch für die Anpassungsmerkmale Beanspruchung, Ermüdung, Motivation, Zufriedenheit und Stimmung. Auch die Qualifikations- und Kompetenzmerkmale wie Erfahrung, Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Bildung und Kompetenz des Menschen stellen eine grundlegende Herausforderung für eine Bestimmung und Quantifizierung dar. Zur Bestimmung und Quantifizierung dieser Merkmale kommen in der Praxis vielfach Befragungs-, Interview- und Studienmethoden zum Einsatz, mit denen in einer Likert-Skala zutreffende und weniger zutreffenden Aussagen zum Beispiel von Werkern oder auch Benutzern bewertet werden [134]. Sie werden jedoch zumeist stark von persönlicher Wahrnehmung beeinflusst.

In der Praxis haben sich Kompetenzerfassungssysteme herausgebildet, die sehr gut als Basis für die Gestaltung von Kompetenzentwicklungsprozessen geeignet sind. Hierzu zeigt KUHLMANN (2008) unterschiedliche Formen der Erfassung auf [135]. KUHLMANN (2008) verwendet dabei fünf Formen der Kompetenzerfassung: Kompetenztest, Kompetenzpässe, Kompetenzbiographien, Kompetenzsimulation und Kompetenzsituation. Nach KUHLMANN (2008) ermöglichen nur Kompetenztests eine

quantitative Messung, indem unterschieden wird, ob ein Test von den Probanden bestanden oder nicht bestanden wurde. Noten oder Punkte liefern zudem eine präzisere Aussage darüber, mit welchem Erfolg ein Test absolviert worden ist. Kompetenzpässe sind qualitativer Natur und werden mittels Fragebögen erhoben. Kompetenzbiografien werden auf Basis von erzählenden Interviews erhoben und sind qualitativ. Kompetenzbiografien gehören zu den sogenannten komparativen Verfahren, da sie nur im Vergleich mit anderen Biografien zum Treffen einer vergleichenden Aussage genutzt werden können. Kompetenzsimulationen dienen der Beobachtung des Verhaltens der Probanden. Die Kompetenzsituation ist ein beobachtendes Verfahren, bei dem die Werker am Arbeitsplatz in realen Situationen beobachtet werden. Nach KUHLMANN (2008) sind alle fünf Verfahren beim Treffen einer ganzheitlichen Aussage zu einer Kompetenzbilanzierung eines Werkers zu beachten [135]. Konkrete Anwendungen werden von RICHTER (2011) aufgezeigt [136]. Die beschriebenen Verfahren zur Erfassung der Beschreibungsparameter sind mit großem Aufwand verbunden.

Die Methode MTM wird auf Grund der Tatsache, dass die Methode sich stets auf ein durchschnittliches Leistungsniveau von Menschen bezieht [86], nicht als Information genutzt worden, um die aufgezeigten menschlichen Beschreibungsparameter zu bestimmen. Den Abgrenzungen und Anforderungen dieser Arbeit folgend werden in dieser Arbeit keine spezifischen Untersuchungen zur Quantifizierung der menschlichen Merkmale und Eigenschaften (Beschreibungsparameter) vorgenommen oder spezifische Modelle entwickelt. Es wird auf vorliegende Methoden zur Quantifizierung menschlicher Beschreibungsmodelle von Einflüssen auf unternehmensorganisatorische Zielsetzungen für die Verwendung DAS verwiesen, wie von BUBB (2005) [137], REFFLINGHAUS & KERN (2015) und JESKE (2013) dargestellt [75], [33]. Die menschlichen Beschreibungsparameter werden im Folgenden dieser Arbeit in Analogie zu den so genannten „Performance Shape Faktoren“ (PSF₃), vgl. Tabelle 93 im Anhang erhoben [137].

6.3 Einflüsse der Beschreibungsparameter auf digitale Assistenzsysteme

In dem folgenden Kapitelabschnitt erfolgt eine Darstellung menschlicher Einflüsse auf die oben dargestellten Zielsetzungen DAS. Erkenntnisse aus Kapitel 6.1 und 6.2 werden dabei verknüpft. Die neu gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend innerhalb eines tabellarischen Regelwerks zusammengefasst.

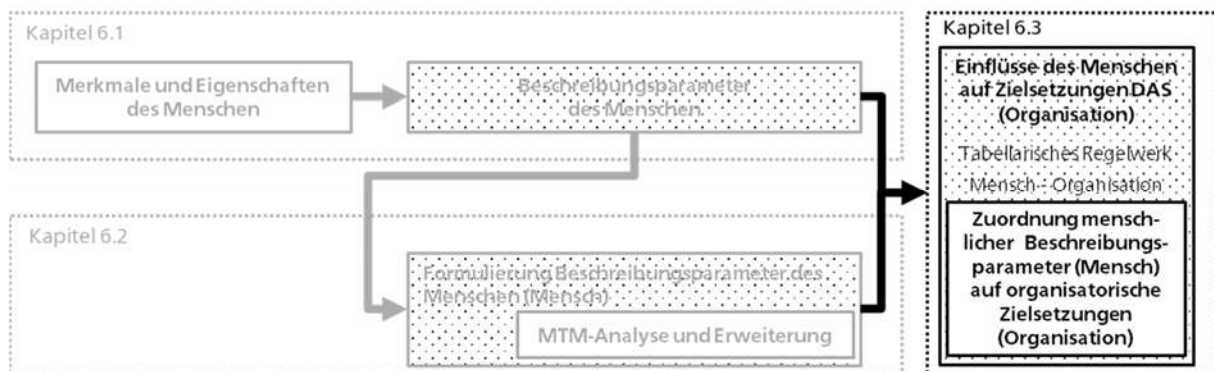


Abbildung 27: Einordnung Einflüsse und Regelwerk (Mensch – Organisation) (eigene Darstellung)

Die in Abbildung 23 dargestellten und in Kapitel 6.1 beschriebenen Bestimmungsgrößen menschlicher Leistungsfähigkeit, welche aus den Konstitutions-, Dispositions-, Anpassungs- sowie Qualifikations- und Kompetenzmerkmale resultieren, üben einen direkten Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit nach JESKE (2013), die menschliche Fehler (menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit, im Folgenden als HEP bezeichnet) nach REFFLINGHAUS & KERN (2015) sowie auf die Einstellung (Motivation und Akzeptanz) des Werkers gegenüber Komponenten DAS aus, mit denen der Worker in direkter Interaktion steht. Damit stellen die Bestimmungsgrößen menschlicher Leistungsfähigkeit einen zentralen Einflussfaktor auf die Anwendung und den Umsetzungserfolg DAS dar [75]. Das heißt, die menschlichen Einflussfaktoren nehmen einen direkten Einfluss auf die Zielsetzungen DAS in der Montage, wie in Kapitel 3.1 dargestellt. Dabei beeinflussen die Konstitutions- und Dispositionsmerkmale, Geschlecht und Alter sowie die Anpassungs-, Qualifikations- und Kompetenzmerkmale, Erfahrung und Motivation auch die Einlern- und Trainingszeit nach JESKE (2013), welche mit der Tätigkeitsausführung eines Montageauftrages für den Worker verbunden ist [33]. Die Beschreibungsparameter Erfahrung, Ermüdung und Motivation üben darüber hinaus einen direkten Einfluss auf die HEP nach REFFLINGHAUS & KERN (2015) aus [137]. Je geringer die Erfahrung und die Motivation in Bezug auf die Ausführung einer Tätigkeit und je größer die Ermüdung eines Werkers ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit [138]. Menschliche Motivation wird als Gesamtheit aller Beweggründe (Motive) eines Menschen definiert, die zu einer Handlungsbereitschaft führen und die somit einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Produktivität eines Werkers [86] haben.

Daneben beeinflusst die menschliche Motivation die menschliche Akzeptanz von Technologien und deren Benutzung (Nutzerakzeptanz). Die Nutzerakzeptanz wird als Bereitschaft zur Nutzung einer Technologie für die Aufgaben definiert, für die diese

entwickelt wurde [139]–[141]. Technologieakzeptanzmodelle werden in der wissenschaftlichen Literatur vielfach beschreiben, unter anderem von VENKATESH und DAVIS (2000), VENKATESH ET AL. (2003), GOODHUE und THOMPSON (1995) und AMMENWERTH ET AL. (2004) [142]–[145]. Diese Modelle konzentrieren sich jedoch vielfach ausschließlich auf die Technologie und betrachten die mit der Nutzung der Technologie korrelierenden Aufgaben (Prozesse) zumeist nur unzureichend [146]. Das sogenannte FITT-Modell (Fit between Individuals, Task and Technology) bietet dagegen einen ganzheitlicheren Betrachtungsansatz für die Interaktion von Mensch, Technik und Aufgabe sowie für die entsprechende Zuordnung der Einflussfaktoren entlang dieser Beziehungsstrukturen [142], [146].

Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit ist festzuhalten, dass die Motivation eines Werkers die Technologieakzeptanz für die Benutzung eines DAS beeinflusst. Der Werker steht dabei vor allem in Interaktion mit den Komponenten DAS des D-Pools, T-Pools, TS-Pools und der Art und Weise, wie und in welcher Form die Informationen angezeigt werden (IR-Pool). In der folgenden Tabelle werden die beschriebenen Einflüsse auf die Zielsetzungen DAS (vgl. Kapitel 3.1) auf Grundlage der Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung und der verknüpften Beschreibungsparametern zusammengefasst [33], [137]. Die Komponenten DAS, mit welchen der Mensch in direkter Interaktion steht, sind auf die Technologie-Pools D, T, IR und auf das TS, hier die Komponenten, bei denen eine manuelle Betätigung erforderlich ist, fokussiert. Der Beschreibungsparameter Benutzerfreundlichkeit und Gebrauchsfreundlichkeit des Systems (System Usability und User Experience) ermöglicht, mittels der SUS-Skala¹², die Bestimmung einer quantifizierbaren Tendenzkennzahlen im Hinblick auf den menschlichen Interaktionseinfluss (vgl. Kapitel 5.2.10) [115].

¹² Bei der System Usability Scale (SUS) handelt es sich um einen einfachen und technologieunabhängigen Fragebogen zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit eines Systems (vgl. Kapitel 5.2.10).

Tabelle 36: Regelwerk – Einflüsse auf auf organisatorische Zielsetzungen DAS (eigene Darstellung)

Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung	Merkmale	Beschreibungsparameter Mensch	Einflüsse auf organisatorische Zielsetzungen DAS	
	Konstitutionsmerkmale	Geschlecht		Einlern- und Trainingszeit
		Körperbau		<i>Kein Einfluss</i>
		Kulturkreis		<i>Kein Einfluss</i>
		Erbanlage		<i>Kein Einfluss</i>
	Dispositionsmerkmale	Persönlichkeit		<i>Kein Einfluss</i>
		Alter		Einlern- und Trainingszeit
		Intelligenz		<i>Kein Einfluss</i>
		Körpergewicht		<i>Kein Einfluss</i>
		Gesundheitszustand		<i>Kein Einfluss</i>
		Rhythmologische Einflüsse		<i>Kein Einfluss</i>
	Anpassungsmerkmale	Erfahrung		Einlern- und Trainingszeit, Menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit
		Wissen		<i>Kein Einfluss</i>
		Fähigkeiten		<i>Kein Einfluss</i>
		Fertigkeiten		<i>Kein Einfluss</i>
		Bildung		<i>Kein Einfluss</i>
		Kompetenz		<i>Kein Einfluss</i>
	Qualifikations- und Kompetenzmerkmale	Beanspruchung		<i>Kein Einfluss</i>
		Ermüdung		Menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit
		Motivation		Menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit <i>Interaktion mit den Komponenten des D-Pools, des IR-Pools, des TS-Pools (Komponenten, bei denen manuelle Betätigung erforderlich ist) und des T-Pools</i>
Zufriedenheit			<i>Kein Einfluss</i>	
Stimmung			<i>Kein Einfluss</i>	

DAS wirken auf den Menschen grundlegend kompensatorisch, präventiv/erhaltend und fähigkeitserweiternd. Auf diese Weise unterstützen digitale Assistenzsysteme Einlern- und Trainingszeiten und fördern die Arbeitsqualität, indem die Systeme zur Reduktion menschlicher Fehler beitragen. Dabei unterstützen digitale Assistenzsysteme arbeitsprozessrelevante sensorische und kognitive Fähigkeiten und gehen dabei auf unterschiedliche Diversity-Dimensionen¹³ in der Belegschaft ein, wie Alter, Geschlecht oder auch ethnische Herkunft. Damit besteht grundlegend die Möglichkeit, dass digitale Assistenzsysteme zu einem erfüllenden Arbeitsumfeld beitragen, das sich positiv auf den Erhalt der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit sowie auf die Arbeitsmotivation und die Arbeitszufriedenheit auswirkt und das tätigkeitsbezogene Defizite kompensiert [148].

¹³ Der Begriff Diversity steht hier für Wertschätzung und Respekt für personelle Vielfalt [147]

Diese positiven Einflüsse von digitalen Assistenzsystemen auf den Menschen und somit auf den Werker im Arbeitssystem der Montage sind durch eine durchgängige Benutzerfreundlichkeit (Usability) und Gebrauchsfreundlichkeit (User Experience) determiniert. Während Benutzerfreundlichkeit sich auf die Tauglichkeit (hier) eines digitalen Assistenzsystems für die eigentliche Nutzung in Bezug auf Effizienz, Effektivität und Nutzerzufriedenheit bezieht, adressiert die Gebrauchsfreundlichkeit Effekte einer antizipierten Nutzung, wie Freude der Nutzung und Identifikation [149], [150].

Neben positiven Mehrwerten DAS besteht das Risiko von Mehraufwänden für den Menschen (Werker), je nach technischer Konfiguration des DAS, indem der Mensch je nach der ihm zur Verfügung gestellten Informationsbreite und -tiefe unterschiedliche Mengen an Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten hat. Darüber kann die Interaktionstätigkeit des Menschen mit einem DAS mit Mehraufwänden verbunden sein. Hier sind vor allem die Komponenten DAS der Technologie-Pools D, TS und IR zu beachten. Auf eine spezifische Darstellung der möglichen Mehraufwände durch menschliche Interaktion mit diesen Technologien wird in Kapitel 8 dieser Arbeit genauer eingegangen.

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitelabschnitt wird der Mensch auf Grundlage beschreibender Eigenschaften und Merkmale dargestellt und Zusammenhänge der Interaktion mit Komponenten DAS aufgezeigt, dem MTO-Konzept in Bezug auf die Schnittmenge Mensch-Organisation folgend. Dabei werden folgende zentrale Eigenschaften und Merkmale des Menschen dargestellt, welche direkten Einfluss auf dessen Leistungsangebot haben und somit die Intensität der Interaktion mit einem DAS determinieren: Alter, Geschlecht, Ermüdung, Motivation, Belastung und Arbeitstempo, Benutzerfreundlichkeit / Gebrauchstauglichkeit und Erfahrung, Training, Wissen, Fähigkeiten, Kompetenzen. Die aufgezeigten Merkmale und Eigenschaften sind dabei den menschlichen Konstitutions-, Dispositions-, Anpassungs-, Qualifikations- und Kompetenzmerkmalen zuzuordnen.

Es zeigt sich, dass der Mensch mit seinen Merkmalen und Eigenschaften in einem direkten Zusammenhang mit den organisatorischen Zielsetzungen DAS in der Montage steht und direkten Einfluss auf Einlern- und Trainingszeiten und sowie zur Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Fehlern nimmt, was schlussendlich die Ausführungszeit beeinflusst. Es wird ferner verdeutlicht, dass DAS auf den Menschen positiv, im Sinne von kompensatorischer, präventiver/erhaltender und fähigkeitserweiternder Unterstützung wirken. In diesem Zusammenhang werden die Komponenten, mit welchen

der Mensch in direkter Interaktion steht, aufgezeigt und die Bedeutung dieser Komponenten in Bezug auf Benutzerfreundlichkeit und Gebrauchstauglichkeit aufgezeigt.

Die Methode MTM bietet keine Informationen zur Bestimmung der identifizierten menschlichen Beschreibungsparameter. Aufgrund der Schwierigkeit der Quantifizierung wird zur Bestimmung der menschlichen Beschreibungsparameter und den daraus resultierenden Einflüssen auf unternehmensorganisatorische Zielsetzungen DAS auf Modelle von BUBB (1992) und REFFLINGHAUS & KERN (2015), im Hinblick auf Einflüsse auf menschliche Fehler als auch auf Modelle von JESKE (2013) im Hinblick auf Einflüsse auf Einlern- und Trainingszeit verwiesen [151], [75], [33].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es gelungen ist, Zuordnungen bezüglich Einflüssen, Verbindungsmöglichkeiten und -anforderungen zwischen menschlichen Beschreibungsparametern, erforderlichen Informationen zur Quantifizierung und Zielsetzungen DAS mittels erweiterter Informationen zu bestimmen. Die entsprechenden Zuordnungen sind regelwerkbasierend zusammengefasst in Tabelle 36. Im folgenden Kapitel wird die dritte Schnittmenge des MTO-Konzeptes, Technik und Organisation im Hinblick auf das Unternehmensziel der Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätserhaltung und -steigerung durch DAS in der Montage dargestellt.

7 Produktive Faktoren digitaler Assistenzsysteme

DAS mit Fokus auf einen industriellen Einsatz in der Montage haben aus betriebswirtschaftlicher und unternehmensorganisatorischer Sicht das Ziel, zu einer Reduktion des Ausführungsaufwandes einer Montagetätigkeit (Ausführungszeiten) und hier vor allem eine Reduzierung des Aufwands zur Informationsbeschaffung und -verarbeitung, zur Reduktion von Suchaufwänden, zur Reduktion von Prozessdokumentationen und Rückmeldungen sowie zur Reduktion des Aufwands bei der Einstellung von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen beizutragen und die Produktivität zu erhöhen. Darüber hinaus verfolgen DAS die Zielsetzungen, Einlern-, Trainingszeiten und menschliche Montagefehler zu reduzieren (vgl. Kapitel 3.1). Diese Einflüsse DAS gehen mit Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten einher und stellen wesentliche Optimierungspotenziale in der Montage dar. Vor diesem Hintergrund werden diese drei Einflüsse DAS in diesem Kapitel genauer beschrieben und im Hinblick auf unternehmensorganisatorische Zielsetzungen bei der Verwendung DAS analysiert. Hierbei werden Ausführungszeiten DAS in Kapitel 7.1, Einlern- und Trainingszeiten mit DAS in Kapitel 7.2 und menschliche Fehler unter Verwendung DAS in Kapitel 7.3 als Beschreibungsparameter DAS definiert und beschrieben. Anschließend erfolgt eine mathematische Formulierung der beschriebenen Beschreibungsparameter, welche in einem Regelwerk zusammengefasst werden. Dabei wird jeweils die Methode MTM im Hinblick auf vorhandenen Informationsgehalt und vorliegende Informationsengpässe analysiert, um Verknüpfungen zwischen der Methode MTM und Komponenten DAS zu bestimmen. Diesbezüglich werden jeweils anschließend, im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Kapitel 4), die jeweiligen Einflüsse zwischen dem jeweiligen Beschreibungsparameter und den Komponenten digitaler Assistenzsysteme, den definierten Technologie-Pools entsprechend (vgl. Kapitel 5.1.1), dargestellt und beschrieben werden.

Das Kapitel stellt auf diese Weise die Schnittmenge Technik-Organisation des MTO-Konzeptes dar, indem der geforderte Mehrwert DAS in der Montage in Form von Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten DAS (Organisation) mit Komponenten DAS (Technik) verbunden wird. Das Bindeglied stellt auch hier die Methode MTM dar. Abbildung 28 verdeutlicht den strukturellen Aufbau dieses Kapitels.

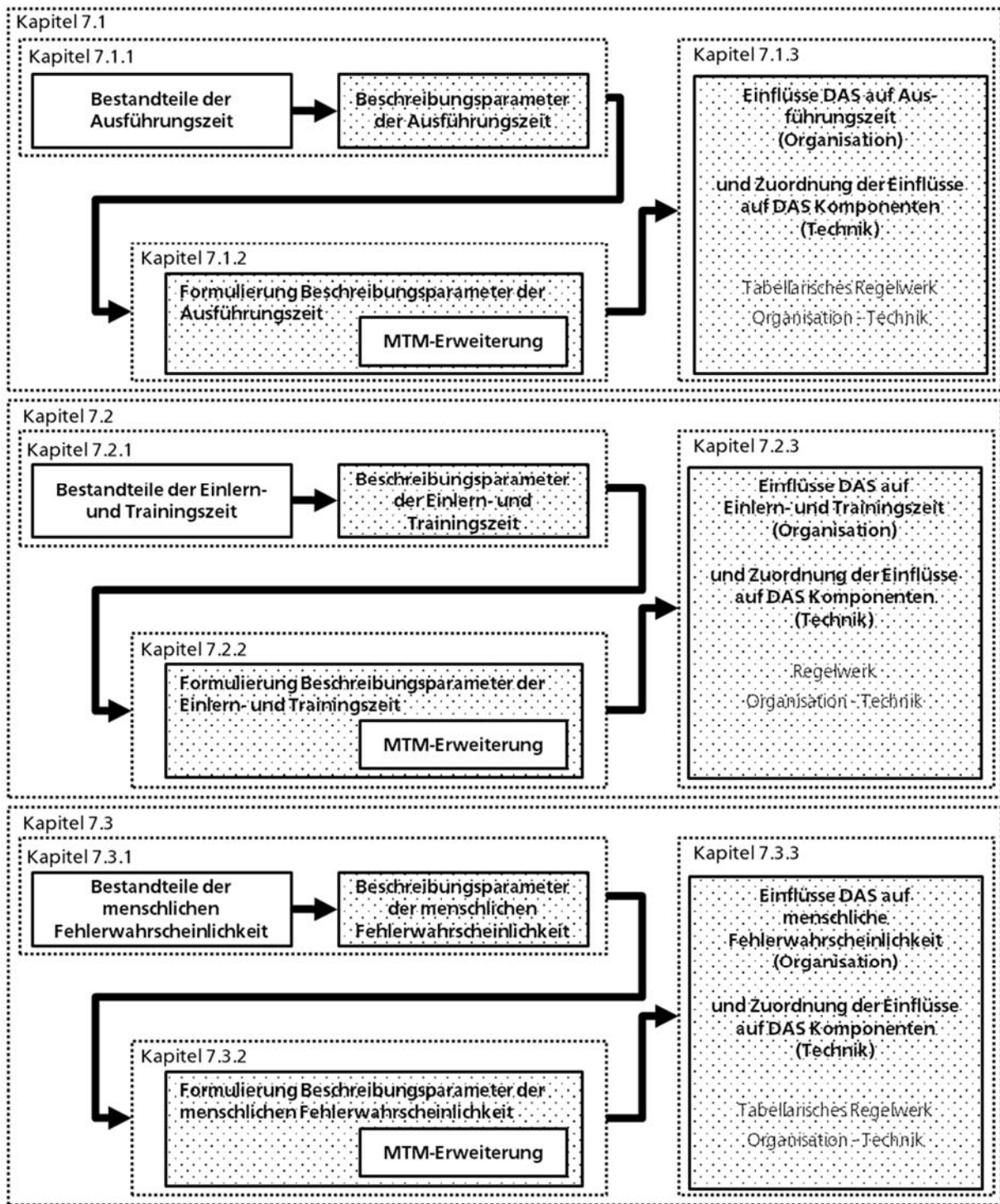


Abbildung 28: Struktureller Aufbau des Kapitels 7 (eigene Darstellung)

7.1 Ausführungszeit

In diesem Abschnitt wird einleitend der Begriff Ausführungszeit in der Montage definiert. Darauffolgend werden zentrale Einflussfaktoren auf die Ausführungszeit durch

DAS in der Montage verdeutlicht. Abschließend werden mathematische Beschreibungsmodelle zur Prognose von Ausführungszeiten mit DAS in der Montage dargestellt, gefolgt von einer Analyse von auf MTM-UAS Analysen basierenden Informationen und Engpässen zur Berechnung des mathematischen Beschreibungsmodells. Ziel ist die Analyse und Beschreibung von quantifizierbare Einflüsse, Verbindungsmöglichkeiten und -anforderungen (Regelwerk) zwischen Komponenten DAS und der organisatorischen Zielsetzung Quantifizierung des DAS Einflusses der Ausführungszeit mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM.

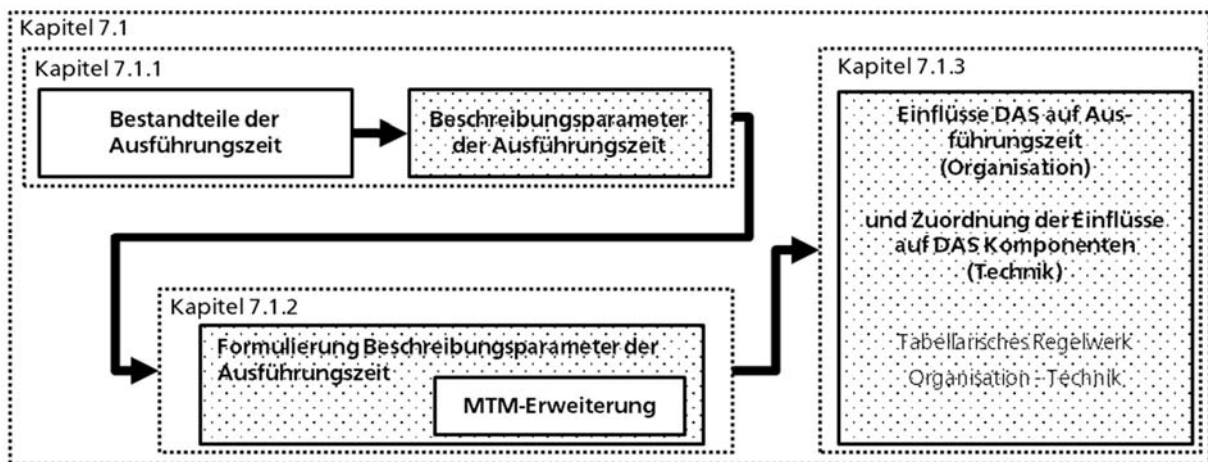


Abbildung 29: Struktureller Aufbau des Kapitels 7.1 (eigene Darstellung)

7.1.1 Beschreibungsparameter Ausführungszeit

Bei der Analyse eines Arbeitsablaufs wird zwischen Haupttätigkeit, Nebentätigkeit, zusätzlicher Tätigkeit, ablaufbedingtes Unterbrechen, störungsbedingtes Unterbrechen, persönlich bedingtes Unterbrechen und Erholung unterschieden [152], [153]. Den Ablaufarten werden unterschiedliche Zeitarten zugeordnet, wie in Abbildung 55 im Anhang dargestellt. Durch Zusammensetzung der einzelnen Zeitarten ergibt sich eine Vorgabezeit für die auszuführende Tätigkeit, welche auch als Auftragszeit bezeichnet wird. Die Auftragszeit setzt sich zusammen aus Rüstzeit¹⁴ und Ausführungszeit¹⁵. Die

¹⁴ Die Rüstzeit bezeichnet die Zeitdauer, welche der Werker zur auftragspezifischen Vorbereitung (Rüsten) des Arbeitssystems benötigt. Die Rüstzeit pro Auftrag ist unterteilbar in eine einmalig anfallende Rüstzeit, also in die sogenannte Rüstgrundzeit, die Rüsterholungszeit und die Rüstverteilzeit [152].

¹⁵ Für die Ausführung der Arbeitsaufgabe ist die sogenannte Ausführungszeit entscheidend. Die Ausführungszeit setzt sich aus einer sogenannten Grundzeit, Erholungszeit und Verteilzeit zusammen [152].

Dauer eines Produktions- beziehungsweise Montageprozesses kann in der Zeitermittlung als Funktion der bei der Ausführung dieser Tätigkeit geltenden, zeitbestimmenden Rahmenbedingungen und Einflussgrößen beschrieben werden [154].

Folglich sind Zeitdaten umso genauer bestimmbar, je mehr Informationen über mögliche Einflussgrößen und den Grad der Abhängigkeit bekannt sind. Für die Arbeitsaufgabe ist die Ausführungszeit für eine bestimmte Menge an Teilen zu bestimmen [154]. REFA unterteilt die Arbeitsablaufanalyse weiter in Bezug auf die Nutzung von Betriebsmitteln in unterschiedliche Ablaufarten, die während der Belegung mit einem Arbeitsauftrag anfallen (vgl. Abbildung 54 im Anhang). Durch Zusammensetzung der einzelnen Zearten kann eine sogenannte Vorgabezeit in Bezug auf die Nutzung des Betriebsmittels bestimmt werden. Diese wird auch als Belegungszeit bezeichnet und wird nach Betriebsmittel-Rüstzeit und Betriebsmittel-Ausführzeit unterschieden [154].

Unter der Begriffsbezeichnung Ausführungszeit wird im Folgenden grundsätzlich die Summe der Ausführungszeiten zur Durchführung der eigentlichen Tätigkeit in der Montage sowie die Interaktionszeit mit einem DAS durch einen Werker verstanden.

7.1.2 Formulierung der Beschreibungsparameter Ausführungszeit

Wie dargestellt, repräsentiert die Ausführungszeit grundsätzlich die Summe der Ausführungszeiten zur Durchführung der eigentlichen Montagetätigkeit sowie die Interaktionszeit mit einem DAS. Während der Montagetätigkeitsanteil der Ausführungszeit mittels der Methode MTM bestimmbar ist, steht die Interaktionszeit mit den Komponenten DAS im Zusammenhang. Grundsätzlich ist die Ausführungszeit wie folgt zu formulieren.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Ausführungszeit} \\
 & = \sum \textit{Zeit zur Durchführung der Tätigkeit} \\
 & + \sum \textit{Interaktionszeit mit DAS}
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 8}$$

DAS determinieren die Zeit zur Durchführung einer Montagetätigkeit unter anderem dadurch, dass (a) papiergebundene Auftragshandhabungs-, (b) Dokumentations- und (c) Such- sowie (d) Kommunikations- und Abstimmungszeiten reduziert werden und durch vernetzte Steuerungssysteme Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge im Montagesystem automatisch konfiguriert werden, wodurch der zeitliche (e) Aufwand für die entsprechende Konfiguration reduziert werden kann wird (vgl. Kapitel 3.1).

Tabelle 37: Einflüsse DAS auf papiergebundene Auftragshandhabungszeiten (eigene Darstellung)

Einflüsse DAS	Beschreibung (Annahme)
Gehen zum Auftragsannahmebereich	Bei einer direkten Bereitstellung der Auftragsinformation am Arbeitsplatz über ein entsprechendes Device entfällt der Weg zu einem zentralen Auftragsannahmeplatz.
Aufnahme und Ablegen der Auftragspapiere (Informationsträger) im Arbeitsbereich	Durch die digitalisierte Bereitstellung des Arbeitsauftrages kann der Arbeitsauftrag direkt, beispielsweise über ein entsprechendes Device, gestartet werden.
Handhaben der Auftragspapiere (Informationsträger)	Das papiergebundene Aufnehmen und Platzieren von Arbeitsaufträgen entfällt durch die digitale Informationsbereitstellung.
Weg zurück zum Auftragsbereitstellungsbereich	Durch eine direkte Bereitstellung der Auftragsinformation am Arbeitsplatz sowie mittels technischer Funktionen zur Auftragsrückmeldung über ein entsprechendes Device entfällt der Weg zu einem zentralen Auftragsannahmeplatz.
Ablegen der Auftragspapiere (Informationsträger) im Auftragsbereitstellungsbereich	In Übereinstimmung mit den genannten Einflüssen entfällt das papiergebundene Wegbringen und -legen sowie das Archivieren von Auftragsinformationspapieren an einem zentralen Auftragsbereitstellungsbereich.

Tabelle 37 stellt die durch DAS determinierende Zeit zur Durchführung einer Montage Tätigkeit in Bezug auf papiergebundene Auftragstätigkeiten dar und zeigt, dass Tätigkeiten der Auftragshandhabung durch DAS reduziert werden können. Je nach technischer Ausgestaltung eines DAS besteht die Möglichkeit, Aufträge automatisch zu starten und abzuschließen. Darüber hinaus kann eine durchgängige Dokumentation des Montagevorganges und der entsprechend durchgeführten Prozesse im Datenbanksystem des DAS hinterlegt werden [107].

Tabelle 38: Einflüsse DAS auf Dokumentationszeiten (eigene Darstellung)

Einflüsse DAS	Beschreibung (Annahme)
Aufnehmen und Ablegen eines Dokumentationspapiers	Durch eine digitale Interaktion (digitale Rückmeldemöglichkeit) mittels DAS kann eine direkte Dokumentation des Montagevorganges und der entsprechend durchgeführten Prozesse über ein entsprechend bereitgestelltes Device durchgeführt werden.
Aufnehmen eines Stiftes und Ansetzen auf Dokumentationspapier	Durch die digitalisierte Dokumentation entfallen Suchzeiten nach Dokumentationsmaterial (Papiervorlagen, Stifte, etc.) sowie das Handhaben entsprechender Utensilien.
Kennzeichnen / Schreiben	Je nach Möglichkeit einer integrierbaren Dokumentation des Montagevorganges und der entsprechenden Prozesse (vgl. Sensorik-Systeme in der Montageperipherie) kann das Kennzeichnen / Schreiben gänzlich entfallen. Ist dies nicht möglich, so kann eine manuelle Kennzeichnung / Schreiben (Rückmeldung) über ein entsprechendes Device erfolgen.
Ablegen eines Stiftes	Durch die digitalisierte Dokumentation entfällt das Handhaben entsprechender Utensilien.
Dokumentationspapier aufnehmen und beispielsweise in Sammelbehälter (zentrale Ablage) ablegen	Durch die digitalisierte Dokumentation entfällt das Handhaben entsprechender Dokumentationspapiere.

Wie in Tabelle 38 dargestellt, besteht durch Verwendung eines DAS die Möglichkeit, Dokumentationszeiten zu reduzieren. Je nach technischer Ausgestaltung des DAS mit

Sensoriken können entsprechende Dokumentationen des Montagevorganges automatisiert werden [12], [107]. Rückmeldeinformationen werden in einer Datenbank innerhalb des DAS Informationssystems gespeichert und stellen die Datengrundlage für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess dar [155].

In einer variantenreichen Montage [42] sorgt DAS für Möglichkeiten, Suchzeiten, beispielsweise nach dem richtigen Materialentnahmeort sowie nach dem richtigen Materialverbauungsort, zu reduzieren. Neben der Reduktion von unnötigen Wegzeiten sind Suchprozesse auch durch visuelle Kontrollen bestimmt.

Tabelle 39: Einflüsse DAS auf Suchzeiten (eigene Darstellung)

Einflüsse DAS	Beschreibung (Annahme)
Unnötige Wegzeiten	Durch die Anzeige der richtigen Materialentnahmeorte und Materialverbauungsorte werden unnötige Wegzeiten durch den Einsatz eines DAS reduziert.
Visuelle Kontrollen und Blick-Suche	Unnötiger Blickaufwand wie beispielsweise auf eine Entnahme-, Positionierungsstelle oder auf eine Prüfungsstelle wird durch ein DAS reduziert.

Durch Integration von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen in DAS bestehen Möglichkeiten, Einstellungszeiten zu reduzieren, indem die Steuerungssysteme von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen mit entsprechenden Einstellungsparametern über das Informationssystem des DAS automatisch konfiguriert werden. Dies erfolgt, indem Steuerungsprogramme entweder direkt aufgerufen oder gestartet werden [64].

Tabelle 40: Einflüsse DAS auf Konfigurationszeiten von Hilfs-, Betriebsmitteln, Werkzeugen (eigene Darstellung)

Einflüsse DAS	Beschreibung (Annahme)
Vergleich des Arbeitsauftrags- oder der auszuführenden Tätigkeit mit einem Regelwerk zur Findung von Einstellungsparametern	Annahme: Die zur Ausführung einer entsprechenden Tätigkeit benötigten Einstellungsparameter werden direkt über ein entsprechendes Device angezeigt.
Einstellung der Hilfs- und Betriebsmittel mit den richtigen Einstellungsparametern	Annahme: Über die Anbindung des DAS an entsprechende Steuerungssysteme von Hilfs- und Betriebsmitteln (beispielsweise via Modbus, UPC UA, MQTT-Connect und andere Kommunikationsprotokolle) können diese direkt mit den zum Auftrag passenden Einstellungsparametern konfiguriert werden.
Probe- und Testdurchführung	Annahme: Etwaige Probe- und Testdurchführungen, ob wirklich die richtigen Einstellungsparameter eingegeben worden sind, können durch eine entsprechende Integration der Hilfs- und Betriebsmittel mit einem DAS entfallen.
Reduktion von Dokumentationszeiten (vgl. oben)	Annahme: Je nach Möglichkeit einer integrierbaren Dokumentation des Montagevorganges mit einem im DAS integrierten Hilfs- und Betriebsmittel kann eine automatische Dokumentation des Montagevorganges erfolgen.
Start des nächsten Montageschrittes	Annahme: Durch Integration von Hilfs- und Betriebsmitteln in ein DAS können ferner Log-Signale der entsprechenden Steuerungssysteme dazu genutzt werden, um im Falle eines erfolgreich abgeschlossenen Tätigkeitsschritts mittels eines integrierten Hilfs- und Betriebsmittels den nächsten Tätigkeitsschritt (getriggert) zu starten. Manuelle Interaktion zum Start des kommenden Arbeitsschritts entfällt. Ein entsprechendes Hilfs- und Betriebsmittel agiert demnach als zusätzliche Sensorik am Montagearbeitsplatz.

Die Integration von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen in ein DAS macht es möglich, Daten über die Montageausführung zu speichern und zu analysieren. Mittels Verknüpfung von Methoden des Complex Event Processings [67] bestehen Möglichkeiten, auf Störungen hinzuweisen und dem Werker im Störfall Informationen zu dessen Behebung zu übermitteln.

Neben diesen Möglichkeiten zur Reduktion der Auftragszeit eines Montageauftrags bergen DAS das Risiko, dass durch zusätzlichen Interaktionsaufwand mit dem DAS die Auftragszeit eines Montageauftrages erhöht wird. Dieser Interaktionsaufwand wird dabei von unterschiedlichen Faktoren determiniert. Im Zuge der Erhaltung der Methodenkonsistenz dieser Arbeit, wird der im Folgenden aufgezeigte Interaktionsaufwand mittels der Methode MTM modelliert. Der Interaktionsaufwand wird im Folgenden genauer beschreiben und ist in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 durch Beobachtungsstudien validiert worden.

- Wegzeiten zur Information (zum Device)
- Informationsaufnahme und Informationsinterpretation
- Bestätigung der Durchführung einer Auftragstätigkeit
- Weiterschaltung (Bedienung) des DAS

Tabelle 41: Regelwerk – Informationsverarbeitungs- und -interpretationszeit (eigene Darstellung)

Modus	Beschreibung der menschlichen Informationsverarbeitung je auszuführenden Tätigkeitsschritt (getroffene Annahmen)
Signal	Durchschnittlich 3 Blicke und durchschnittlich 2 Einzelmerkmale vergleichen: $3 * VC + 2 * IAVE = 3 * 15 \text{ TMU} + 2 * 30 \text{ TMU} = 105 \text{ TMU} = 3,78 \text{ Sekunden}$
Text	Lesen von durchschnittlich 3 Wörtern und durchschnittlich 2 Einzelmerkmale vergleichen: $3 * IALW + 2 * IAVE = 3 * 25 \text{ TMU} + 2 * 30 \text{ TMU} = 135 \text{ TMU} = 4,86$
Bild	Aufnahme / Vergleich von durchschnittlich 2 Einzelmerkmalen und 2 Einzelmerkmale vergleichen: $2 * IAVE + 2 * IAVE = 2 * 30 \text{ TMU} + 2 * 30 \text{ TMU} = 120 \text{ TMU} = 4,32 \text{ Sekunden}$
Animation	Aufnahme / Vergleich von durchschnittlich 2 Einzelmerkmalen und 2 Einzelmerkmale vergleichen: $2 * IAVE + 2 * IAVE = 2 * 30 \text{ TMU} + 2 * 30 \text{ TMU} = 120 \text{ TMU} = 4,32 \text{ Sekunden}$
Video	Aufnahme / Vergleich e von durchschnittlich 2 Einzelmerkmalen und 2 Einzelmerkmale vergleichen: $2 * IAVE + 2 * IAVE = 2 * 30 \text{ TMU} + 2 * 30 \text{ TMU} = 120 \text{ TMU} = 4,32 \text{ Sekunden}$
Sprache (Voice)	Hören von durchschnittlich 3 Wörtern und durchschnittlich 2 Einzelmerkmale vergleichen: $3 * 36 \text{ TMU} (\sim 1,3 \text{ sec}) + 2 * IAVE (=30 \text{ TMU}) = 111 \text{ TMU} = 6,06 \text{ Sekunden}$
Augmented Reality	Aufnahme / Vergleich e von durchschnittlich 2 Einzelmerkmalen und 2 Einzelmerkmale vergleichen: $2 * IAVE + 2 * IAVE = 2 * 30 \text{ TMU} + 2 * 30 \text{ TMU} = 120 \text{ TMU} = 4,32 \text{ Sekunden}$

Wie in Kapitel 5.2.1 dargestellt, ist bei der Auswahl des richtigen Mobilitätsgrades des richtigen Device die Wegzeit zur Informationsanzeige relevant. Durch Beachtung des richtigen Mobilitätsgrades des Device können Wegzeiten reduziert oder zu eliminiert werden, da die Information vom Werker mitgeführt wird. Die Informationsaufnahme

und die Informationsinterpretation hängt von der Informationsmenge und der entsprechenden Darstellungsform (Informationsrepräsentationsform) ab. Je mehr Einzelmerkmale miteinander zu vergleichen sind, desto mehr Zeit wird benötigt. Tabelle 41 verdeutlicht Beobachtungsergebnisse im Zuge der Informationsaufnahme- und Informationsinterpretation in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0.

Neben der Informationsaufnahme und -interpretation ist der Interaktionsaufwand, das manuelle Interagieren mit dem Device, von hoher Relevanz. Folgende Tabelle verdeutlicht Annahmen, welche im Zuge von Beobachtungsstudien in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 zur Interaktion (Weiterschalten, aktuellen Vorgang bestätigen und nächsten Vorgang starten) mit verschiedenen Devices durchgeführt worden sind. Ergänzend zu den dargestellten Zeitangaben ist die Informationsverarbeitungszeit des DAS relevant. Auf Grund hoher Technologieunterschiede wird auf die Informationsverarbeitungszeit nicht näher eingegangen.

Tabelle 42: Regelwerk – zu Device – Interaktionszeit (eigene Darstellung)

Device	Beschreibung des menschlichen Interaktionsaufwands je auszuführenden Tätigkeitsschritt (getroffene Annahmen)
Screen	Greifen zur Mouse. Visuelle Kontrolle der Cursor-Position am Monitor. Cursor auf entsprechende Schaltfläche des grafischen User-Interfaces bewegen und klicken. $VC + AA2 + VC + AA1 + ZA2 + ZD = (15 + 35 + 15 + 20 + 15 + 20) \text{ TMU} = 120 \text{ TMU} = 4,32 \text{ Sekunden}$
Touch-Screen	Mit dem Finger auf die entsprechende Schaltfläche am grafischen User-Interface gehen. Finger positionieren und Schaltfläche drücken. $VC * 2 + AA2 + PC1 + BA1 = (15 * 2 + 35 + 30 + 10) \text{ TMU} = 150 \text{ TMU} = 3,78 \text{ Sekunden}$
Tablet	Mit dem Finger auf die entsprechende Schaltfläche am grafischen User-Interface gehen. Finger positionieren und Schaltfläche drücken. $VC * 2 + AA2 + PC1 + BA1 = (15 * 2 + 35 + 30 + 10) \text{ TMU} = 150 \text{ TMU} = 3,78 \text{ Sekunden}$
Glass	Mit dem Finger Richtung Schaltfläche gehen. Mit dem Finger vorsichtig den genauen Schalterpunkt identifizieren (i.d.R. 3 Suchvorgänge – je nach Modell nötig). Mit dem Finger die Schaltfläche betätigen. $AA2 + ZA1 * 3 + ZD = (35 + 3 * 5 + 20) \text{ TMU} = 70 \text{ TMU} = 2,52 \text{ Sekunden}$
Projektion	Mit dem Finger Richtung Schaltfläche gehen. Mit dem Finger die Schaltfläche betätigen. $AA2 + ZA1 + ZD = (35 + 5 + 20) \text{ TMU} = 70 \text{ TMU} = 2,16 \text{ Sekunden}$
Light	Mit dem Finger Richtung Schaltfläche gehen. Mit dem Finger die Schaltfläche betätigen. $AA2 + ZA1 + ZD = (35 + 5 + 20) \text{ TMU} = 70 \text{ TMU} = 2,16 \text{ Sekunden}$
Voice	Sprechen von durchschnittlich 1,5 Wörtern zum Weiterschalten oder Zurückschalten. $1,5 * 1,3 \text{ Sekunden} = 1,95 \text{ Sekunden}$
Laser	Mit dem Finger Richtung Schaltfläche gehen. Mit dem Finger die Schaltfläche betätigen. $AA2 + ZA1 + ZD = (35 + 5 + 20) \text{ TMU} = 70 \text{ TMU} = 2,16 \text{ Sekunden}$
Signal	Mit dem Finger Richtung Schaltfläche gehen. Mit dem Finger die Schaltfläche betätigen. $AA2 + ZA1 + ZD = (35 + 5 + 20) \text{ TMU} = 70 \text{ TMU} = 2,16 \text{ Sekunden}$

Durch Nutzung von sensorgenerierten Daten, welche über den Abschluss eines Tätigkeitsvorganges erzeugt werden, besteht die Möglichkeit, einen entsprechenden Tätigkeitsschritt als gestartet oder abgeschlossen zu identifizieren. Diese Information kann

benützt werden, um erfolgreich durchgeführte Tätigkeiten als abgeschlossen zu definieren und diese Information zum Starten des nächsten Tätigkeitsschritts zu verwenden. Auf diese Weise gelingt es, den manuellen Interaktionsaufwand auf ein Minimum zu reduzieren. Der Autonomiegrad des DAS steigt.

7.1.3 Einflüsse digitaler Assistenzsysteme auf Ausführungszeiten

Im Folgenden werden Einflüsse DAS auf Ausführungszeiten durch Ableitung von Informationen auf Basis der Methode MTM und spezifisch auf Grundlage von MTM-UAS Analysen und Aufbaustufen [86] betrachtet und analysiert, bei welchen eine grundsätzliche Verknüpfung zwischen DAS und Ausführungszeiten im Hinblick auf die Ausführung von Montagetätigkeiten möglich sind, in Bezug auf (a) papiergebundene Auftragshandhabungs-, (b) Dokumentations- und (c) Such- sowie (d) Kommunikations- und Abstimmungszeiten sowie in Bezug auf (e) Aufwand zur entsprechenden Konfiguration von Hilfs- und Betriebsmitteln.

Bezüglich Einflüsseffekte auf papiergebundene Auftragshandhabungen sind die MTM-UAS Prozessbausteine in der Aufbaustufe „Informationen verarbeiten“ genauer zu betrachten. Eine detaillierte Darstellung der Prozessbausteine ist bei BOKRANZ ET AL. (2012) zu finden [86]. Von einem DAS sind Prozesse des Handhabens von Informationsträgern zu betrachten. Durch Bereitstellung des Auftrages mittels DAS ist ein Aufnehmen und Ablegen, sowie etwaiges Tauschen eines papiergebundenen Auftrags obsolet. Auch das Abreißen oder Trennen von Auftragspapieren entfällt [12], [107].

Tabelle 43: Regelwerk – zu papiergebundenen Auftragshandhabungszeiten (eigene Darstellung)

Tätigkeiten, welche mittels DAS reduziert werden	Beschreibung der Einflüsse auf Basis entsprechender MTM-UAS Prozessbausteine [86] (getroffene Annahmen)
Weg zum Auftragsannahmebereich	Der MTM-UAS Prozessbaustein KA in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse, wie beispielsweise Auftragspapiere holen, wird durch ein DAS eliminiert.
Aufnahme und Ablegen der Auftragspapiere (Informationsträger) im Arbeitsbereich	Der MTM-UAS Prozessbaustein IAHA wird durch ein DAS eliminiert.
Handhaben der Auftragspapiere (Informationsträger)	Die MTM-UAS Prozessbausteine IAHT und IAHR wird durch ein DAS eliminiert.
Weg zurück zum Auftragsbereitstellungsbereich	Der MTM-UAS Prozessbaustein KA in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse, wie beispielsweise Auftragspapiere holen, wird durch ein DAS eliminiert.
Ablegen der Auftragspapiere (Informationsträger) im Auftragsbereitstellungsbereich	Der MTM-UAS Prozessbaustein IAHA wird durch ein DAS eliminiert.

Wie bereits im Kapitel 5 dargestellt, werden Dokumentationszeiten von DAS beeinflusst. Durch gezielten Einsatz von Sensorsystemen und deren Anbindung an das DAS besteht die Möglichkeit, manuelle Dokumentationsaufwände zu eliminieren [12], [107].

In der folgenden Tabelle wird dargestellt, welche Möglichkeiten es für die Identifikation einzelner Tätigkeiten einer Dokumentation durch MTM-UAS-Analysen gibt.

Tabelle 44: Regelwerk – zu manuellen Dokumentationszeiten (eigene Darstellung)

Tätigkeiten, welche mittels DAS reduziert werden	Beschreibung der Einflüsse auf Basis entsprechender MTM-UAS Prozessbausteine [86] (getroffene Annahmen)
Aufnehmen und ablegen eines Dokumentationspapiers	Der MTM-UAS Prozessbaustein IAHA wird durch ein DAS eliminiert.
Aufnehmen eines Stiftes und ansetzen an Dokumentationspapier	Der MTM-UAS Prozessbaustein EH in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse über das Werkzeug / Hilfsmittel (bspw. Stift) wird durch ein DAS eliminiert.
Kennzeichnen / Schreiben	Die MTM-UAS Prozessbausteine IAKK, IAKW, IAKS und IAKA in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse zum Grund, wie beispielsweise Dokumentieren, wird durch ein DAS eliminiert. Die Prozessbausteine sind in Ergänzung zu den Zeitwerten mit Eingabetätigkeiten IDTE, IDTW, IDES oder IDEM zu ersetzen.
Ablegen eines Stiftes	Der MTM-UAS Prozessbaustein EH in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse über das Werkzeug / Hilfsmittel (bspw. Stift) wird durch ein DAS eliminiert. Jedoch in EH fallen die Tätigkeiten Aufnehmen und Ablegen zusammen.
Dokumentationspapier aufnehmen und beispielsweise in Sammelbehälter ablegen	Der MTM-UAS Prozessbaustein IAHA wird durch ein DAS eliminiert.

In Tabelle 45 wird dargestellt, wie Suchzeiten mittels MTM-UAS Analysen identifiziert werden können.

Tabelle 45: Regelwerk – zur Bestimmung von Suchzeiten und -aufwänden (eigene Darstellung)

Tätigkeiten, welche mittels DAS reduziert werden	Beschreibung der Einflüsse auf Basis entsprechender MTM-UAS Prozessbausteine [86] (getroffene Annahmen)
Unnötige Wegzeiten	Der MTM-UAS Prozessbaustein KA in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse, wie beispielsweise der Angabe Suchen, wird durch ein DAS eliminiert.
Visuelle Kontrollen und Blick-Suche	Der MTM-UAS Prozessbaustein VA in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse, wie beispielsweise der Angabe Suchen, wird durch ein DAS eliminiert.

DAS tragen dazu bei, den Aufwand für die manuelle Einstellung von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen zu reduzieren. Folgende Tabelle zeigt auf, wie diese Tätigkeiten auf Basis von MTM-UAS Analysen zu identifizieren sind.

Tabelle 46: Regelwerk – zur Bestimmung Konfigurationszeiten und -aufwänden (eigene Darstellung)

Tätigkeiten, welche mittels DAS reduziert werden	Beschreibung der Einflüsse auf Basis entsprechender MTM-UAS Prozessbausteine [86] (getroffene Annahmen)
Vergleich des Arbeitsauftrags mit einem Regelwerk zur Findung der richtigen Einstellungsparameter	Die MTM-UAS Prozessbausteine IAKK, IAKW, IAKS und IAKA in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse, wie beispielsweise Lesen (IALE, IALW) und Einstellparameter feststellen, werden durch ein DAS eliminiert.
Einstellung der Hilfs- und Betriebsmittel mit den richtigen Einstellungsparametern	Die MTM-UAS Prozessbausteine PZ, IDTE, IDTF, IDES und IDEM in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse, wie Einstellparameter feststellen, werden durch ein DAS eliminiert.
Probe- und Testdurchführung	Die MTM-UAS Prozessbausteine, welche die Aufbaustufen „ Schraubarbeiten “, „ Prüfen oder Messen “, „ Markieren “, „ Klebearbeiten “, „ Behandeln “, „ Normteile montieren “, „ Festspannen und Lösen “, „ Auspacken “, „ Elektrik-Leitungen montieren “ mit Hinweis auf die Verwendung eines Hilfs- oder Betriebsmittels in Kombination mit zusätzlichen Informationen in der MTM-Analyse, wie beispielsweise Probe- und Testdurchführung , werden durch ein DAS eliminiert.
Reduktion von Dokumentationszeiten	Vergleiche Tabelle 38
Start des nächsten Montageschrittes	Vergleiche Tabelle 41

Die zur Berechnung der Ausführungszeit benötigte Anzahl der durchzuführenden Tätigkeiten ist auf Grundlage der MTM-Analyse bestimmbar. Um entsprechend die durch den Werker zu erbringende Interaktionszeit zu bestimmen (vgl. Tabelle 42), sind in den MTM-UAS Analysen Informationen zur chronologischen Abfolge der Montagevorgänge und -sequenzen zu ergänzen [10], [64].

7.1.4 Fazit

Im Zuge einer Quantifizierung der Einflüsse DAS auf die Ausführungszeit wurde eine Beschreibung der Einflüsse auf eine papiergebundene Auftragsinformationshandhabung und auf den damit verbundenen Zeitaufwand, auf Dokumentations-, Such-, Kommunikations- und Abstimmungszeiten sowie auf den Zeitaufwand für die Konfiguration von klassischen, bei der Ausführung von Montagetätigkeiten benötigten Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeuge dargestellt und Regeln definiert.

Darüber hinaus wurden im Hinblick auf Einflüsse auf die Ausführungszeit unterschiedliche Informationsrepräsentationsformen der in Kapitel 5.1.1 entwickelten Morphologie entsprechend beschrieben. Die Beschreibung erfolgte dabei auf Basis einer MTM-UAS Analyse und entsprechender Bezugsgrößen als Multiplikator, hier der Anzahl der durchzuführenden Tätigkeiten. Die Beschreibung der Einflüsse erfolgte auf getroffenen Annahmen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dargestellt, in einen ganzheitlichen Zusammenhang gebracht und mittels eines Regelwerks verdeutlicht. Die Zusammenfassung des Regelwerks ist im Anhang der Tabelle 99 - Tabelle 104 zu entnehmen.

Das Kapitel verdeutlicht, dass es mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM gelingt, Einflüsse auf die Ausführungszeit zu quantifizieren und Verbindungsmöglichkeiten und -anforderungen (Regelwerk) zwischen Komponenten DAS mit der Ausführungszeit darzustellen. Dazu sind der Einfluss der Ausführungszeit durch DAS, bezugnehmend auf die Zeit zur Durchführung einer Tätigkeit in der Montage sowie bezugnehmend auf die Interaktionszeit zu beschreiben sowie Verknüpfungen und Anforderungen (Regelwerk) zwischen dem Beschreibungsparameter Ausführungszeit und den relevanten Komponenten DAS hergestellt worden.

7.2 Einlern- und Trainingszeit

Zunächst werden die Begriffe Anlern- und Trainingszeiten mit Fokus auf Montagetätigkeiten definiert. Darauffolgend werden Einflussfaktoren verdeutlicht sowie Einflüsse DAS auf Anlern- und Trainingseffekte von Werkern dargestellt. Anschließend werden mathematische Beschreibungsmodelle zur Prognose von Anlern- und Trainingszeiten in der Montage dargestellt. Abschließend erfolgt eine Analyse von MTM-UAS Informationen zur quantifizierten Bestimmung des mathematischen Beschreibungsmodells. Ziel ist dabei eine Analyse von Verbindungsmöglichkeiten und -anforderungen zwischen Komponenten DAS und der organisatorischen Zielsetzung Quantifizierung des DAS Einflusses auf Einlern- und Trainingszeit mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM.

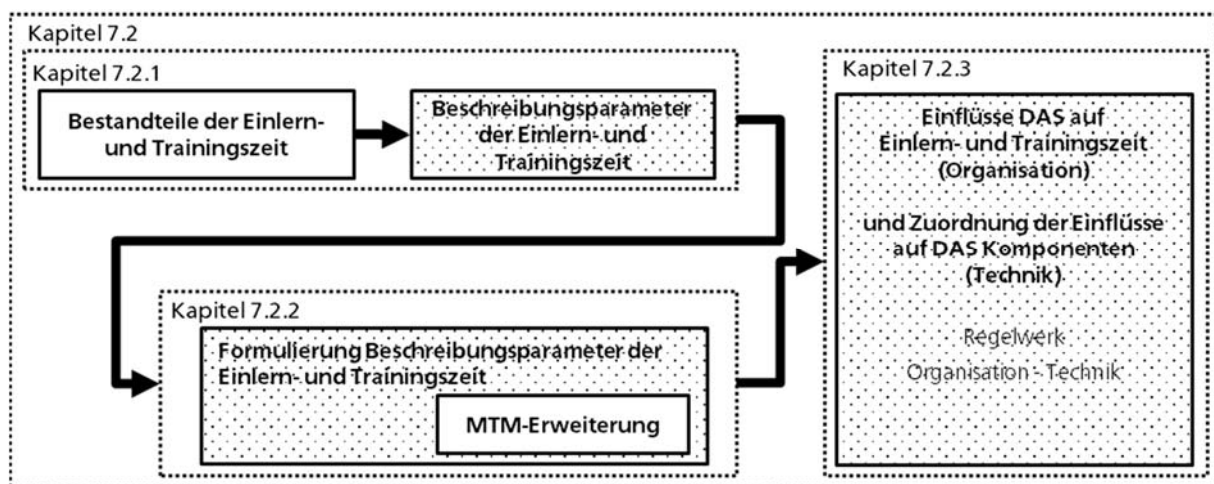


Abbildung 30: Struktureller Aufbau des Kapitels 7.2 (eigene Darstellung)

7.2.1 Beschreibungsparameter Einlern- und Trainingszeit

Anlernzeiten setzen sich aus zwei Phasen zusammen. Zum einen aus der Phase der Einführung in die Arbeitsaufgabe und zum anderen aus der Phase des Einübens bis

zum Erreichen der Bezugsleistung [23]. Die Phase zur Einführung in die Arbeitsaufgabe beginnt mit dem Zeitpunkt, an dem der anzulernende Werker Informationen zur Ausführung der Arbeitsaufgabe erhält. Abhängig von der Information führt der Werker zunächst die Arbeitsaufgabe unselbstständig und fremdbestimmt durch bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Werker in der Lage ist, die Arbeitsaufgabe selbstständig auszuführen. Ab diesem Zeitraum beginnt die Zeit des Einübens bis zum Erreichen der Bezugsleistung. Die Bezugsleistung [86] beschreibt dabei eine vorgegebene Leistung beziehungsweise eine Vorgabezeit, welche in Verbindung zur Arbeitsaufgabe und deren Qualitätsanforderungen steht. Bezugnehmend auf eine Ermittlung von Vorgabezeiten sind Methoden der Zeitaufnahmen nach REFA (1997), Systeme von vorbestimmten Zeiten wie MTM oder Maynard Operation Sequence Technique (MOST) anwendbar [33], [23], [154]. Die folgende Grafik verdeutlicht einen grundlegenden zeitlichen Verlauf der Anlernzeit.

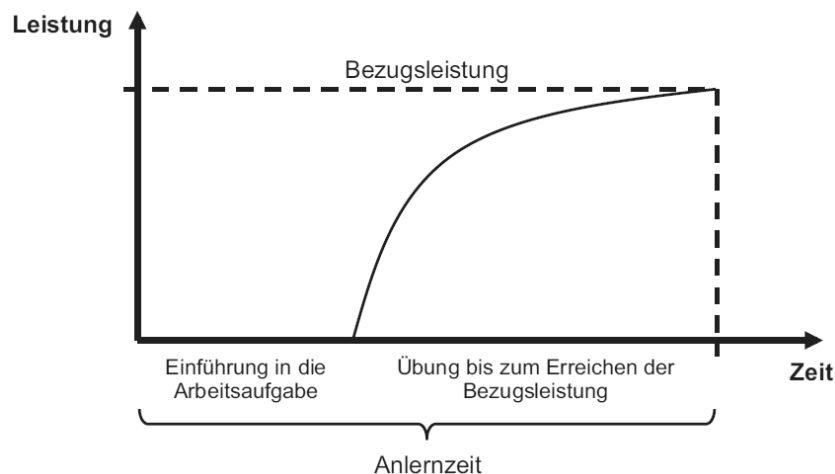


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Anlernzeit [23]

Im Folgenden wird eine Definition der Anlernzeit von der Einübung bis zum Erreichen der Bezugsleistung angeführt, da (a) die zeitliche Dauer zur Einführung in die Arbeitsaufgabe vor allem in der Maßnahme stark variiert [33] und (b) ein jeweiliger Einführungsaufwand in die Arbeitsaufgabe im Hinblick auf die Erfordernisse von Losgröße 1 in der Praxis nur schwer herstellbar ist. Der Werker ist demnach gefordert, in der Tätigkeitsausführung zu lernen, wobei DAS unterstützen.

Eine Vielzahl unterschiedlicher Größen beeinflussen die Anlernzeit, welche in folgende Klassen eingeteilt sind [23], [156]:

- Einflüsse, welche durch die anzulernende Arbeitsperson determiniert sind
- Einflüsse, welche sich aus der Wahl der Anlernmethode ergeben

- Einflüsse, welche die Arbeitsaufgabe determiniert

Einflüsse, welche durch die anzulernende Arbeitsperson determiniert sind, ergeben sich aus den individuellen Eigenschaften der Arbeitsperson (vgl. Kapitel 6.1). Einflüsse, welche sich aus der Wahl der Anlernmethode ergeben, werden durch die Kombination von Anlernperson und -aufgabe, der gewählten Anlernmethode sowie der eingesetzten Lernmedien determiniert. Dabei ist die Bedeutung der Verständlichkeit und der Anschaulichkeit von Arbeitsplänen und von Prüfanweisungen hervorzuheben. Daneben üben eine Unterteilung von Arbeitsaufgaben, das Festlegen von Übungsschwerpunkten, -pausen und die Rückmeldung des Übungserfolgs einen Einfluss aus. Die integrierte Verwendung von Anreizsystemen stellt einen weiteren Einfluss dar [33].

Die durch die Arbeitsaufgabe determinierten Einflüsse auf die Anlernzeit setzen sich zum einen aus der Arbeitsaufgabe selbst, zum anderen aus dem Arbeitsumfeld zusammen. Beschreibungen und Bewertungen von Arbeitsaufgaben in der Montage sind anwendungsorientiert vor allem mit Systemen vorbestimmter Zeiten (SvZ) durchzuführen. Die Taxonomie SvZ ermöglicht es, Aussagen zum Einfluss der Arbeitsumgebung, beispielsweise durch die Erfassung von Greifmodi der zu manipulierenden Materialien, Greifabständen oder auch durch Erfassung von Entfernungsbereichen, zu identifizieren [33]. Einflüsse der Arbeitsaufgabe auf die Anlernzeit aus informationstheoretischer Sicht fokussieren die mit der Arbeitsaufgabe verbundene Entropie [33]. Im Folgenden wird der informationstheoretischen Definition in Anlehnung an SHANNON (1948) gefolgt, welcher auf der Betrachtung des Zusammenhangs von Unsicherheit und Information basiert und besagt, dass durch die Beseitigung von Unsicherheit umso mehr Information gewonnen wird, je größer die Unsicherheit war. Konkret verdeutlicht diese Definition der Entropie, mit welcher Wahrscheinlichkeit verschiedene Ereignisse aus einer Grundgesamtheit auftreten. Die Entropie ist genau dann maximal, wenn aus einer Gesamtheit disjunkter Ereignisse jedes einzelne Ereignis mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftritt. Beim Eintreten eines der Ereignisse wird die Unsicherheit beseitigt und die Information wird im selben Ausmaß erlangt [33]. Mathematisch wird informationstheoretische Entropie wie folgt definiert:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i, \quad i \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 9}$$

N stellt die Gesamtheit aller möglicher disjunkter Ereignisse dar und p_i die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Ereignisses. Die Einheit der Entropie ist Bit. Ein Bit entspricht dem Informationsgehalt zweier Möglichkeiten, die mit gleicher Wahrscheinlichkeit eintreten können [33], [157]. Eine valide Methode zur Bewertung der Schwierigkeit

von Arbeitsaufgaben mit Hilfe von Entropiemaßen wurde von JESKE (2013) entwickelt [33]. Sie wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

7.2.2 Formulierung der Beschreibungsparameter Einlern- und Trainingszeit

Die Dauer bis zum Erreichen der Bezugsleistung wird von einer Lernkurve beschrieben. Eine Lernkurve stellt den Grad des Lernerfolgs über den Verlauf der Zeit dar. Die Lernkurve wird über den Quotienten aus Lernertrag und Lernaufwand ausgedrückt [33], [158]. In der Literatur findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Lernkurvenmodelle [156], [158]–[160]. Alle Lernkurvenmodelle folgen jedoch dem Kurvenverlauf, welcher in Abbildung 32 dargestellt ist [33].

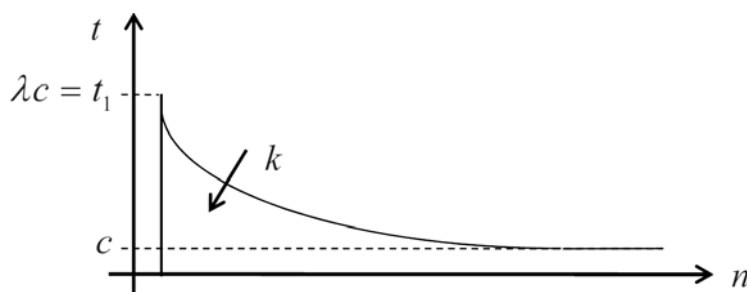


Abbildung 32: Darstellung einer Lernkurve sowie der zu bestimmenden Modellparameter [33]

Nach JESKE (2013) sind für eine Lernkurve drei Parameter zu bestimmen [33]:

- der Grenzwert c
- die Zeit für die erste Arbeitsausführung t_1 und
- die langfristige Lerngeschwindigkeit k

Der Grenzwert c ist nach JESKE (2013) durch den Einsatz von SvZ (MTM) bestimmbar –[33]. Der Wert repräsentiert demnach die Bezugsleistung, welche nach der Anlernphase erzielt wird. Der Zeitwert t_1 , welcher die Zeit der ersten Arbeitsausführung darstellt, ist auf den Grenzwert c bezogen, multipliziert mit λ , als Indikator für die Schwierigkeit der Arbeitsaufgabe. Der Zeitwert t_1 ist wie folgt definiert [33]:

$$t_1 = c_i * \lambda_i \quad i \in \{MTM - 1, MTM - UAS\} \quad \text{Gleichung 10}$$

Der Indikator λ wird von JESKE (2013) mittels eines Regressionsmodells auf Basis gewonnener Studienergebnisse wie folgt berechnet [33]:

$$\lambda = 2,256 + 0,978 \sqrt{H_{UAS}^2 + H_B^2} - 0,755 E_{Mont} - 0,45D + 0,87G \quad \text{Gleichung 11}$$

Hier stellt H_{UAS} die Entropie der MTM-UAS Prozesselemente dar, welche zur Modellierung einer Aufgabe benötigt werden, unter Verwendung der relativen Häufigkeit der

einzelnen Elemente als Schätzwert für ihre Auftrittswahrscheinlichkeit. H_B repräsentiert die Entropie der Bauteile, unter Verwendung der relativen Häufigkeit der einzelnen Bauteile als Schätzwert für ihre Auftrittswahrscheinlichkeit. Beide Entropiewerte lassen sich nach Gleichung (09) berechnen. E_{MONT} repräsentiert die Erfahrung der Arbeitsperson mit der Montagetätigkeit und ist subjektiv innerhalb einer vierstufigen Likert-Skalierung zu erfassen (keine Erfahrung = 1, wenig Erfahrung = 2, mittlere Erfahrung = 3, viel Erfahrung = 4). D repräsentiert die Art des Arbeitsplans und ist ebenso Likert-skaliert unterteilt nach informatorischer Reichhaltigkeit zu erfassen (textbasiert = 1, text- und bildbasiert = 2, bildbasiert = 3, filmbasiert = 3). Die Einflussgröße G repräsentiert das Geschlecht der Arbeitsperson. Hier wird zwischen 1 = männlich und 2 = weiblich unterschieden [33].

Die Lerngeschwindigkeit k kann auf Basis der multiplen Regressionsbestimmung von JESKE (2013) wie folgt bestimmt werden [33].

$$k = 0,0141 + 0,073\lambda - 0,008FF_1 + 0,006FF_6 + 0,0013A \quad \text{Gleichung 12}$$

In Übereinstimmung mit der aufgezeigten Gleichung erhöht eine zunehmende Vielfachheit λ sowie ein zunehmendes Alter (A) die Lerngeschwindigkeit k . JESKE (2013) verdeutlicht mit der aufgezeigten Gleichung, dass motorische Fähigkeiten einen heterogenen Einfluss auf die Lerngeschwindigkeit haben. Er stellt fest, dass eine hohe Handgelenk-Finger-Geschwindigkeit (FF_6) die Lerngeschwindigkeit positiv beeinflusst und dass eine hohe Zielgerichtetheit von Bewegungen (FF_1) einen hemmenden Einfluss auf die Lerngeschwindigkeit hat. Jeske greift bei der Bestimmung der Handgelenk-Finger-Geschwindigkeiten sowie bei der Bestimmung der Zielgerichtetheit von Bewegungen auf Fleishman-Faktoren (FF) zurück [161], [162], welche mithilfe einer Faktorenstruktur [163] bestimmt werden. Fleishman-Faktoren werden in T-Werten ausgedrückt und nehmen einen Wert zwischen 0 und 100 an. Dabei repräsentiert das Intervall zwischen 40 und 60 eine durchschnittliche Leistung. Höhere Werte repräsentieren eine bessere Leistung. Zur Bestimmung der Fleishman-Faktoren sei an dieser Stelle auf HAMSTER (1980) verwiesen [163].

Wird nun das Regressionsmodell λ in das Modell der Lerngeschwindigkeit eingesetzt, so ergibt sich folgende Gleichung [33]:

$$k = 0,306 + 0,071\sqrt{H_{UAS}^2 + H_B^2} - 0,055E_{MONT} - 0,033D + 0,063G - 0,008FF_1 + 0,006FF_6 + 0,013A \quad \text{Gleichung 13}$$

Die Anzahl notwendiger Wiederholungen bis zum Erreichen der Bezugszeit wird mit folgender Gleichung ausgedrückt. Das Vielfache des gewünschten Grenzwertes beziehungsweise das Akzeptanzniveau wird in diesem Zusammenhang mit ξ bezeichnet, es gilt $\xi > 1$) [33]:

$$N = e^{\left(\frac{1}{-k} \ln \frac{\xi-1}{\lambda-1}\right)} \quad \text{Gleichung 14}$$

Die Ermittlung der Anlernzeit basiert auf der Summation der N einzelnen Ausführungsdauern von t_1 bis t_n , wobei keine Pausenzeiten sowie eventuelle Zuschläge berücksichtigt werden [33]:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N t_n &= \sum_{n=1}^N c + (\lambda c - c) n^{-k \left(1 + e^{\frac{k}{2}(1-n)}\right)} \\ &= cN + c(\lambda - 1) \sum_{n=1}^N n^{-k \left(1 + e^{\frac{k}{2}(1-n)}\right)} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 15}$$

Mittels der aufgezeigten Gleichungssysteme kann die Lernkurve bestimmt werden [33]. Eine systematische Übersicht, welche Informationen für die Berechnung aus einer MTM-UAS Analyse bestimmbar und welche nicht bestimmbar sind, wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

Tabelle 88 im Anhang gibt einen detaillierten Überblick über die zur Berechnung der oben angeführten Gleichungssysteme benötigten Informationen, und zwar im Hinblick darauf, welche Informationen auf Basis einer MTM-UAS Analyse bestimmbar sind. Hiernach ist es möglich, die Bezugsleistung, das heißt, den Grenzwert c und die Entropie der Prozesselemente direkt abzuleiten. Unter der Voraussetzung, dass zu jedem Tätigkeitsschritt das zu verbauende Material oder die zu verbauende Baugruppe angeführt wird (erweiterte MTM-UAS Analyse) ist auch eine Bestimmung der Entropie der Bauteile gegeben. Nicht aus einer MTM-UAS Analyse ableitbar sind die Erfahrungen, das Geschlecht (Gender) sowie das Alter des Werkers, beziehungsweise des Montageteams. Ergänzend kann die Art des Arbeitsplans, die Fleishman-Faktoren FF1 und FF6, nicht aus einer MTM-UAS Analyse bestimmt werden. Diese Werte sind ebenso wie das Akzeptanzniveau ξ manuell anzugeben.

7.2.3 Einflüsse digitaler Assistenzsysteme auf Einlern- und Trainingszeiten

Aufbauend auf JESKE (2013) hat vordergründig die Art, beziehungsweise die Form der Darstellung des Arbeitsplanes Einfluss auf Einlern- und Trainingszeiten [33]. JESKE (2013) hat sich bei seinen Untersuchungen jedoch ausschließlich auf konventionelle Arbeitspläne zur Werkerunterstützung bezogen [33]. Quantifizierte Erkenntnisse aus Untersuchungen zu Einflüssen digitalisierter Darstellungsformen auf Einlern- und Trainingszeit liegen gegenwärtig nicht in Bezug auf einzelne Darstellungsformen DAS

vor. Vor diesem Hintergrund sind in Bezug auf die Informationsdarstellungsformen, welche mittels eines DAS zu erzielen sind, sind im Rahmen dieser Arbeit Kurzstudien mit studentischen Probanden durchgeführt worden, welche in Ergänzung zu Untersuchungen von Einflüssen einzelner Darstellungsformen, wie von LÖDDING und FRIEDWALD (2014) zu sehen sind [164]. Die Zielsetzung der durchgeführten Kurzstudien war es, grundlegende Erkenntnisse zum Treffen von Annahmen zu gewinnen, wie unterschiedliche Informationsdarstellungsformen DAS Einlern- und Trainingszeiten in einer praxisorientierten Laborumgebung beeinflussen. Hierzu erhielten jeweils 120 Studentinnen und Studenten eine spezifische Montageaufgabe, bei denen die Probanden von verschiedenen Informationsdarstellungsformen unterstützt worden sind. Die ersten 15 Studentinnen und Studenten wurden dabei mit einer kurzen klassischen (papiergebundenen) Einschulung über die auszuführenden Montagetätigkeiten in Kenntnis gesetzt. Dabei wurden die Probanden mit einer papiergebundenen Einschulungsunterlage, in welcher die Montagetätigkeit durch Text- und Bildinformationen beschreiben wird, eingeschult. Auf die Einschulungsunterlagen durfte während der anschließenden Ausführung der Montagetätigkeit nicht zurückgegriffen werden. Insgesamt wurden von jedem Probanden vier Durchgänge durchgeführt. Die folgende Tabelle stellt die durchschnittliche Durchführungszeit der 15 Probanden dar.

Tabelle 47: Durchschnittliche Ausführungszeit bei Text- und Bildinformationen (eigene Darstellung)

Anzahl Durchgänge	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Durchgang 4
Durchschnittliche Ausführungszeit in Sekunden	00:43:05	00:17:51	00:15:41	00:14:52

Abbildung 56 im Anhang visualisiert zum einen den Kurvenverlauf und zeigt zum anderen eine lineare Trendlinie auf, welche mit folgender Gleichung beschrieben ist.

$$f(X) = -0,006x + 0,031 \quad \text{Gleichung 16}$$

Zum Vergleich zu den gewonnenen Erkenntnissen sind anschließend mit ebenfalls 15 Probanden Studien unter Einsatz DAS durchgeführt worden. Dabei wurden die Informationsrepräsentationsformen, Bild, Signal, Voice, Text, Animation, Video und Augmented Reality betrachtet (vgl. Abbildung 57 - Abbildung 63 im Anhang). Die Informationsrepräsentationsformen Bild, Text, Animation und Video sind dabei auf einem Touch-Screen-Monitor ausgegeben worden. Die Informationsrepräsentationsform Signal wurde über ein Lichtsignal dargestellt. Das Lichtsignal (Laser) gab dabei stets den Ort der Materialentnahme sowie den Ort der Verbauung an. Die Informationsrepräsentation Voice wurde über Kopfhörer an die Probanden weitergegeben. Bei der Informationsrepräsentationsform Augmented Reality wurden den Probanden mit dem Device HoloLens als Glass-Device, Text- und Bildinformationen zur Verfügung gestellt. Um

Zeiten der Interaktion mit dem DAS auszuschließen, wurde der Abschluss der Tätigkeitsausführung durch Weiterschalten des Beobachters gewährleistet, sodass automatisch der nächste Tätigkeitsschritt angezeigt wird. Um eine Ergebnisbeeinflussung durch das Informationsverarbeitungssystem auszuschließen, wurden alle Informationsrepräsentationsformen auf demselben Informationssystem verarbeitet und vom selben Informationssystem ausgegeben. Folgende Ergebnisse wurden festgehalten:

Tabelle 48: Beobachtete Ausführungszeiten bei unterschiedlichen Informationsrepräsentationsformen (eigene Darstellung)

Informationsrepräsentationsform	Durchschnittliche Ausführungszeit in Sekunden			
	Wiederholung 1	Wiederholung 2	Wiederholung 3	Wiederholung 4
Bild	00:42:54	00:15:50	00:14:45	00:14:52
Signal	00:40:09	00:22:05	00:15:26	00:13:23
Sprache	00:36:40	00:21:37	00:21:22	00:09:35
Text	00:34:57	00:18:43	00:16:55	00:14:05
Animation	00:41:50	00:16:15	00:14:09	00:14:50
Video	00:41:48	00:15:58	00:14:00	00:14:30
Augmented Reality	00:33:30	00:17:35	00:14:02	00:14:26

Tabelle 48 verdeutlicht, dass die höchsten Lerneffekte mittels der Informationsrepräsentationsform Augmented Reality identifiziert worden sind, in welcher Bild- und Textinformationen gekoppelt vorliegen [165]. Gefolgt wird diese Informationsrepräsentationsform von den Formen Voice und Text. Danach kommen die Informationsrepräsentationsformen Animation und Video. Auffallend ist, dass die gemessenen durchschnittlichen Durchführungszeiten zwischen den Formen Animation und Video kaum voneinander abweichen. Es folgen die Informationsrepräsentationsformen Picture und mit Abstand die Form Signal. Die durchschnittlichen Durchführungszeiten bei unterschiedlichen Informationsrepräsentationsformen sind in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 gemessen worden und sind im Anhang dieser Arbeit einzusehen. Die Funktionen der Trendlinien sind in Tabelle 49 verdeutlicht, ergänzt durch ein berechnetes Flächenintegral zwischen der Obergrenze 1 und der Untergrenze 4 als theoretische Vergleichsgrundlage der Einflussnahme der Informationsrepräsentationsformen.

Tabelle 49: Trendfunktionen in Bezug auf Einlern- und Trainingszeiten (eigene Darstellung)

Informationsrepräsentationsform	Trendfunktion	Fläche
Bild	$f(X) = -0,0059x + 0,0301$	- 0,04605
Signal	$f(X) = -0,0060x + 0,0309$	- 0,04770
Sprache	$f(X) = -0,0057x + 0,0290$	- 0,04425
Text	$f(X) = -0,0045x + 0,0259$	- 0,04395
Animation	$f(X) = -0,0058x + 0,0295$	- 0,04503
Video	$f(X) = -0,0058x + 0,0295$	- 0,04503
Augmented Reality	$f(X) = -0,0042x + 0,0245$	- 0,04200

Gleichung 17

Gleichung 18

Gleichung 19

Gleichung 20

Gleichung 21

Gleichung 22

Gleichung 23

Basierend auf der Trendlinienfunktion der klassischen Einschulung wurde zwischen einer Obergrenze 1 und einer Untergrenze 4 ein Flächenintegral von $-0,04818$ berechnet. Wird der Annahme Folge geleistet, dass das Flächenergebnis bezugnehmend auf die klassische Einschulung als Ausgangssituation zu den übrigen Informationsrepräsentationsformen betrachtet wird, sind folgende Aussagen zum Einfluss der betrachteten Informationsrepräsentationsformen als getroffene Annahmen, basierend auf gewonnenen Erkenntnissen der durchgeführten Kurzstudien, auf Einlern- und Trainingszeiten ableitbar. Die Erkenntnisse sind in folgendem Regelwerk formuliert.

- Im Vergleich zu klassischen Einschulungen reduziert die Informationsrepräsentation Signal (IR_1) die Einlern- und Trainingszeiten im Durchschnitt um 1% (Annahme).
- Im Vergleich zu klassischen Einschulungen reduziert die Informationsrepräsentation Text (IR_2) die Einlern- und Trainingszeiten im Durchschnitt um 8% (Annahme).
- Im Vergleich zu klassischen Einschulungen reduziert die Informationsrepräsentation Bild (IR_3) die Einlern- und Trainingszeiten im Durchschnitt um 4% (Annahme).
- Im Vergleich zu klassischen Einschulungen reduziert die Informationsrepräsentation Animation (IR_4) die Einlern- und Trainingszeiten im Durchschnitt um 6% (Annahme).
- Im Vergleich zu klassischen Einschulungen reduziert die Informationsrepräsentation Video (IR_5) die Einlern- und Trainingszeiten im Durchschnitt um 6% (Annahme).
- Im Vergleich zu klassischen Einschulungen reduziert die Informationsrepräsentation Sprache (IR_6) die Einlern- und Trainingszeiten im Durchschnitt um 7% (Annahme).
- Im Vergleich zu klassischen Einschulungen reduziert die Informationsrepräsentation Augmented Reality (IR_7) die Einlern- und Trainingszeiten im Durchschnitt um 12% (Annahme).

Die getroffenen Annahmen beziehen sich ausschließlich auf den Einfluss der Informationsrepräsentationsform auf durchschnittliche Einlern- und Trainingszeiten. Annahmen in Bezug auf das eingesetzte Device und dessen Einfluss auf Einlern- und Trainingszeiten werden an dieser Stelle auf Grund der hohen Komplexität nicht getroffen. Darüber hinaus sind keine weiteren Annahmen in Bezug auf Abhängigkeiten der Probanden sowie der Tätigkeits- und Arbeitsplatzkomplexität erfolgt. Es wird jedoch der Annahme gefolgt, dass von entsprechenden Korrelationsbeziehungen auszugehen ist, deren Untersuchung den Umfang dieser Arbeit jedoch sprengen würde. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Annahme gefolgt, dass die betrachteten Informationsrepräsentationsformen die Einlern- und Trainingszeiten mit den oben dargestellten Werte beeinflussen.

7.2.4 Fazit

In Kapitel 7.2 wurden die Begriffe Einlern- und Trainingszeit definiert und die Einflüsse und Einflussfaktoren beschrieben. Im Folgenden wurde eine Methode dargestellt, mit deren Anwendung es möglich ist, eine Lernkurve auf Basis unterschiedlicher Tätigkeitsausführungen zu erzeugen. Die von JESKE (2013) entwickelte Methode basiert auf Informationen aus MTM-UAS Analysen mit der Möglichkeit, entsprechende quantifizierte Aussagen zu Einlern- und Trainingszeiten zu treffen [31].

Auf der Grundlage von Beobachtungsstudien, welche in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 durchgeführt worden sind, wurden Annahmen zu unterschiedliche Informationsrepräsentationsformen getroffen. Das Kapitel verdeutlicht ein Regelwerk zum Einfluss unterschiedlicher Informationsrepräsentationsformen DAS auf Einlern- und Trainingszeiten. Die Zusammenfassung des Regelwerks ist im Anhang der Tabelle 99 - Tabelle 104 zu entnehmen.

Das Kapitel verdeutlicht, dass es mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM gelingt, Einflüsse DAS auf Einlern- und Trainingszeiten quantitativ zu bestimmen und Verknüpfungen, Verbindungsmöglichkeiten und -anforderungen (Regelwerk) zwischen dem Beschreibungsparameter Einlern- und Trainingszeit und verbundenen Komponenten DAS herzustellen.

7.3 Menschliche Fehler

In diesem Abschnitt erfolgt eine grundlegende Definition der Begriffe menschliche Zuverlässigkeit und menschlicher Fehlerwahrscheinlichkeit (HEP) sowie eine Identifizierung, Beschreibung und Analyse zentraler Einflussfaktoren. Darauf aufbauend werden Methoden und Modelle zur Bestimmung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit in der Montage sowie Regelwerke zur Quantifizierung aufgezeigt.

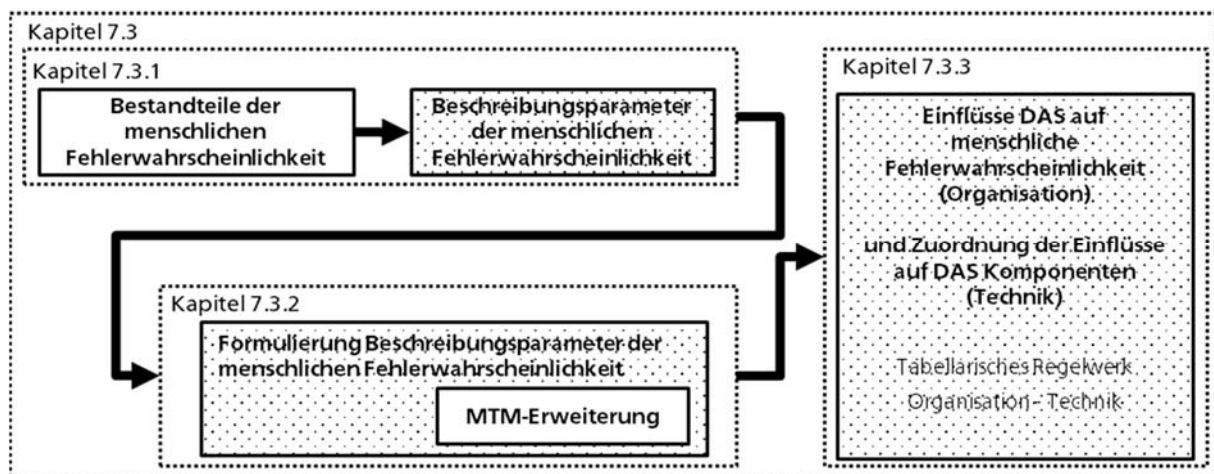


Abbildung 33: Struktureller Aufbau des Kapitels 7.3 (eigene Darstellung)

Im Weiteren erfolgt eine mathematische Beschreibung des identifizierten Regelwerkes zur Bestimmung HEP sowie eine Analyse von MTM-UAS basierten Informationen zur quantifizierten Berechnung. Abschließend werden mit HEP verknüpfbare Komponenten DAS dargestellt und der Versuch unternommen, deren Einfluss auf die HEP zu quantifiziert. Ziel ist dabei eine Analyse von Verbindungsmöglichkeiten und -anforderungen zwischen Komponenten DAS und der organisatorischen Zielsetzung Quantifizierung des DAS Einflusses auf menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM.

7.3.1 Beschreibungsparameter menschliche Fehler

Die VDI Richtlinie 4006 definiert menschliche Zuverlässigkeit als die Fähigkeit eines Menschen, eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls und innerhalb eines spezifischen Akzeptanzbereichs durchzuführen. Der Mensch wird als Systemglied eines Mensch-Maschinen-Systems (MMS) gesehen, er beeinflusst Zuverlässigkeit und Sicherheit des MMS maßgeblich. Technische Maßnahmen, welche die Eintrittswahrscheinlichkeit von Schäden und Störfällen vermeiden, werden als aktive Sicherheit bezeichnet. In der MMS-Betrachtung stellt der Mensch darüber hinaus ein schutzbedürftiges Element dar. Alle Maßnahmen, welche

die Höhe eines durch Betriebsstörung verursachten Schadens verringern, werden als passive Sicherheit bezeichnet. Nur durch Berücksichtigung der auftretenden Wechselwirkung im MMS ist eine zuverlässige und sichere Funktion des Gesamtsystems zu erreichen. Da diese Funktion erheblich von den individuellen Eigenschaften des Menschen abhängt, sind Wechselwirkungen des technischen Systems in Abhängigkeit zu Ausbildungs-, Qualifikations- und Trainingsgraden des Menschen zu betrachten. Eingänge in das MMS sind Aufgaben (Aufgabenstellung), die durch das System zu erfüllen sind. Ausgänge sind als das Ergebnis (Aufgabenerfüllung) zu sehen [166].

Umwelt- und Umgebungseinflüsse beeinflussen die Interaktion von Mensch und Maschine. Äußere Wirkungen auf den Menschen führen zu Belastungen. Aufgrund der individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen führen diese Belastungen zu unterschiedlichen Beanspruchungen. Beeinflussende Faktoren werden als sogenannte leistungsbeeinflussende Faktoren oder Performance Shaping Factors (PSF) bezeichnet [151]. Die Verbindung von äußeren Belastungen und menschlichen individuellen Leistungsvoraussetzungen führt zu einer individuellen menschlichen Beanspruchung [87]. In einem MMS erfasst der Mensch eine Aufgabeninformation, verarbeitet und überträgt sie auf die Maschine, um das angestrebte Ergebnis zu erreichen. Durch die Art der Verschaltung von Mensch und Maschine ergeben sich kognitive Belastungen [166], welche das Risiko menschlicher Fehler beinhalten [167].

Als Kenngröße für menschliche Zuverlässigkeit steht die Wahrscheinlichkeit einer menschlichen Fehlhandlung, die sogenannte Human Error Probability (HEP). Diese ist definiert als Verhältnis der Zahl n (Anzahl beobachteter Fehler) in Relation zu der Gesamtzahl N (Anzahl Möglichkeiten für den Fehler) [166]:

$$HEP = \frac{\text{Zahl der beobachteten Fehler}}{\text{Zahl der Möglichkeiten für einen Fehler}} = \frac{n}{N} \quad \text{Gleichung 24}$$

Als Kenngröße für die menschliche Zuverlässigkeit ist das mathematische Komplement zur Wahrscheinlichkeit der menschlichen Fehlhandlung, die sogenannte Human Reliability Probability (HRP), anzugeben [166]:

$$HRP = 1 - HEP \quad \text{Gleichung 25}$$

Vielfältige Faktoren haben einen Einfluss auf die menschliche Zuverlässigkeit, es werden sachliche und menschliche Faktoren unterschieden [166]. Auf diese Faktoren wird im Folgenden genauer eingegangen.

In der Literatur wird eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren und Methoden zur Analyse und Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit beschrieben [168]. Grundsätzlich ermöglichen die Verfahren und Methoden folgende Aussagen [169]:

- Wie hoch die Sicherheit und Verfügbarkeit eines technischen Systems unter Berücksichtigung menschlicher Eingriffe ist;
- Welches Ausmaß menschliche Fehlhandlungen annehmen;
- In welcher Relation eine bestimmte menschliche Fehlhandlung zu einer anderen menschlichen Fehlhandlung steht;
- Welche Möglichkeiten zur Erhöhung der Sicherheit und Zuverlässigkeit bestehen.

In Tabelle 89 im Anhang wird die allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung menschlichen Zuverlässigkeit aufgezeigt. Die Vorgehensweise folgt der Methode Human Reliability Assessment (HRA) [169]. Bei der Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit muss berücksichtigt werden, inwieweit Werker mit den zu bewertenden Handlungen vertraut sind. Man unterscheidet fertigkeitsbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten. Mit der Methode HRA besteht die Möglichkeit, auf unterschiedliche Analysetiefen einzugehen, wobei Grob- und Feinscreening unterschieden werden [169].

Nach SCHINDELE (1996) werden unter dem Oberbegriff HRA-Verfahren verschiedene Ansätze zusammengefasst, die sich in Expertenverfahren, analytischen Verfahren sowie in unterstützende Verfahren klassifizieren lassen. Auf Expertenschätzungen beruhende Verfahren stellen Vorschriften bereit, anhand derer aus Einzelschätzungen von Experten die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit einer Teil- oder Gesamtaufgabe ermittelt werden kann [93], [170]. Demgegenüber zeichnen sich modellbasierte, analytische Verfahren dadurch aus, dass sie auf einer detaillierten Analyse der zu bewertenden Arbeitsaufgabe beruhen und eine systematische Vorgehensweise verlangen. Nachdem die zu bewertende Arbeitsaufgabe in Teilaufgaben zerlegt worden ist, werden den Aufgabenabschnitten Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten zugewiesen, die auf empirischen oder experimentellen Daten beruhen. Ein Teil der analytischen Verfahren sieht im Einflussfaktor Zeit den Haupteinflussfaktor für das Auftreten von Fehlhandlungen. Aus dem Verhältnis von verfügbarer Zeit und benötigter Zeit wird hierbei die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit abgeleitet. Unterstützende Verfahren beinhalten keine eigene Modellvorstellung über das menschliche Verhalten. Sie werden angewendet, um die beschriebenen Verfahren effektiv anzuwenden oder erforderliche Modelle der zu untersuchenden Systeme aufzustellen und die anfallenden Berechnungen einfach durchzuführen [93]. Tabelle 90 im Anhang gibt einen Überblick über zentralen Verfahren [170], [171].

Im Zuge der Zielsetzung dieser Arbeit gilt es, die menschlichen Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten bei unterschiedlichen Tätigkeiten in der Montage abzuschätzen, um

in Folge eine Korrelation von Einflüssen auf die menschlichen Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten mittels eines DAS Einsatzes vorzunehmen. Diesem Ziel folgend werden im Folgenden die HRA-Verfahren ESAT und THERP ausgewählt. Die Auswahl des Verfahrens wird insbesondere mit folgenden Argumenten begründet:

- Die Verfahren zur Vorhersage der menschlichen Zuverlässigkeit wurden primär für den Einsatz in besonders sicherheitskritischen Bereichen entwickelt. Ausgehend von dieser ursprünglichen Entwicklungsrichtung stellen die Verfahren THERP und ESAT den Anspruch, für alle Funktionen in einem MMS einsetzbar zu sein [170].
- Darüber hinaus haben Untersuchungen von Lolling und Kern [93] [137] gezeigt, dass sich eine Kombination der beiden Verfahren sowohl bei Kommissioniertätigkeiten als auch bei Montagetätigkeiten anbietet. Zur Beschreibung der Abhängigkeiten der Teilprozesse und zur Berechnung der Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit kann die von Swain und Guttman [172] für THERP entwickelte HRA-Ereignisbaummethode verwendet werden [93] [137].

Die beiden HRA-Verfahren ESAT und THERP werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Ihre mathematische Beschreibung wird aufgezeigt.

7.3.2 Formulierung der Beschreibungsparameter menschlicher Fehler

Das Expertensystem für Aufgabentaxonomie (ESAT) ist mit dem Ziel entwickelt worden, beliebige Aufgaben, die in einem MMS durchgeführt werden, nach der Zuverlässigkeit ihrer Durchführung zu klassifizieren. ESAT ist eine Methode, welche eine quantifizierte Abschätzung der Wahrscheinlichkeit menschlicher Arbeitsfehler ermöglicht. Grundlage der Klassifizierung bildet eine Einteilung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit in zehn Intervalle (Zuverlässigkeitsklassen) mit monoton ansteigender Intervallbreite, welche in der folgenden Tabelle dargestellt ist [93].

Tabelle 50: Einteilung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit in Zuverlässigkeitsklassen [93]

ZK	HEP _{min} (ZK)	HEP _{max} (ZK)	D (ZK)
10	0,7000	1,0000	0,3000
9	0,4500	0,7000	0,2500
8	0,2600	0,4500	0,1900
7	0,1330	0,2600	0,1270
6	0,0620	0,1330	0,0710
5	0,0260	0,0620	0,0360
4	0,0096	0,0260	0,0164
3	0,0033	0,0096	0,0063
2	0,0010	0,0033	0,0023
1	0,0001	0,0010	0,0009

Durch eine Einordnung nach HEP besteht die Möglichkeit, definierte Aufgaben nach der Zuverlässigkeit ihrer Durchführung einzuordnen. Die zugeordneten Aufgaben werden nach Aufgabenmerkmalen wie Aufgabentyp, Schwierigkeit, Komplexität und Zeitbedarf gekennzeichnet. Auf Basis verschiedener Erkenntnisse über die Anwendung wurde das Verfahren im Hinblick darauf weiterentwickelt, eine Aufgabe mit ausreichender Genauigkeit zu beschreiben. Auf diese Weise ist eine Aufgabe als Zeitablauf von Aufgabenelementen analysiert worden, der Durchführungsbedingungen (Belastungen durch Einflussfaktoren) zugewiesen worden sind, um die Aufgabe in eine entsprechende Zuverlässigkeitsklasse einordnen zu können [173]. Abbildung 34 verdeutlicht die Vorgehensweise.



Abbildung 34: Vorgehensweise des Verfahrens ESAT [173]

Basis des Verfahrens ist eine Aufgabenbeschreibung, die es ermöglicht, Einflussfaktoren aufzuzeigen. Folgendes ist dabei darzustellen [173]:

- Beschreibung aller erforderlichen Wahrnehmungen (Aufnahme welche Informationen, welcher Informationsquelle);
- Beschreibung aller erforderlichen mentalen Operationen (Verarbeitung der aufgenommenen Informationen, Entscheidungen über die erforderlichen Handlungen);
- Beschreibung aller zum Aufgabenziel führenden Handlungen (Abgabe von resultierenden Informationen);
- Definition des Zeitbedarfs t_a zur Durchführung der Aufgabe.

Zur Darstellung der einzelnen Aufgabentätigkeiten sind nach ESAT vorgegebene und standardisierte Aufgabenelemente zu verwenden. Jedes Aufgabenelement besteht aus einem Aufgabenteilelement, aus den Aktivitäten (Tätigkeit der Wahrnehmung, mentale Verarbeitung oder Handlung) und den dafür erforderlichen Informationen (beispielsweise Lagerortnummer zur Identifikation) und aus Informationsquellen und -senken (beispielsweise Display). Ein Auszug der standardisierten Aufgabenelemente ist im Anhang in Anlehnung an BRAUSER (1990) und LOLLING (2003) angeführt [174], [93].

Zur Berechnung des Belastungsvektors sind die Aufgabenelemente mit der Elementarzeit t , also der Zeit für die Durchführung des Aufgabenelementes, sowie mit einem

Vorgewicht d in Bezug auf ihre relative Schwierigkeit zu versehen. Die einzelnen Aktivitäten, Informationen und Informationsquellen und -senken werden zu Komponenten in Gruppen zusammengefasst und mit einem Code für die jeweilige Art a der jeweiligen Komponente versehen. Beispielsweise besteht die Komponente Entscheidung aus der Aktivitätsgruppe aus den Elementen Wählen/Auswählen und Entscheiden. Dabei ist die Aktivität Entscheiden mit dem Code E2 versehen. Dieser Code wird bei der Durchführung des Verfahrens zur Aufgabenbeschreibung verwendet. Bei der Modellierung des Zeitablaufs wird davon ausgegangen, dass die Aufgabendurchführung gemäß der Aufgabenbeschreibung in Aufgabenelemente eingeteilt wird, die nacheinander abzuarbeiten sind. Die Durchführung hat so zu erfolgen, dass zunächst Informationen aufgenommen (Informationsaufnahme), verarbeitet (Informationsverarbeitung) und in Handlungen umgesetzt (Informationsabgabe) werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Durchführung der Aufgaben im Allgemeinen nacheinander erfolgt, dass aber auch gleichzeitig ablaufende Aktivitäten vorkommen können. Im Falle, dass eine Aufgabe mehrere Unteraufgaben mit Wahrnehmungselementen – mentalen Operationen und Handlungen – enthält, sind die Unteraufgaben entsprechend der oben beschriebenen Reihenfolge zu erfassen. Das Modell beruht auf der Annahme, dass jedes einzelne Aufgabenteilelement (Aktivität) als zeitlich gewichtete Belastung anzusetzen ist. Dementsprechend ist jedes Aufgabenelement wie folgt anzusetzen [174]:

- Jedes Aufgabenelement besteht aus einer Aktivität a_{ij} sowie den dafür erforderlichen Informationen und Informationsquellen und -senken.
- Jede Aktivität a_{ij} wird in einer Zeitdauer t_{ij} durchgeführt. Diese Zeitdauer ist entweder in den oben abgebildeten Tabellen enthalten oder sie wird bei der Aufgabendefinition neu bestimmt.
- Jede Aktivität a_{ij} ist als unterschiedlich belastend anzusehen, d.h. allen Aktivitäten wird ein ermittelter Belastungsanteil d_{ij} zugeordnet;
- Dazu erhalten alle durch die Aktivität a_{ij} aufgenommenen, verarbeiteten oder abgegebenen k Informationen (I) sowie die sie erzeugenden Informationsquellen (Q) oder die sie weiterleitenden Bediengeräte (B) ein entsprechendes Vorgewicht d .
- Alle für das Aufgabenelement a_{ij} zutreffenden k Vorgewichte d werden addiert zu d_{ijk} .
- Der Belastungsanteil d_{ij} jedes Aufgabenelementes ist proportional zu seinem Zeitanteil t_{ij} / t_a :

$$d_{ij} = (t_{ij} / t_a) * d_{ijk} / 10.0$$

Gleichung 26

Auf diese Art ergibt sich die relative Schwierigkeit d_{ij} des Aufgabenelements a_{ij} .

Wie angeführt, wirken sich verschiedene Einflussfaktoren auf die Durchführung von Aufgaben aus, welche im Zug der Berechnung des sogenannten Belastungsvektors zu berücksichtigen sind. Nach BRAUSE (1990) sind dabei fünf Einflussfaktoren zu unterscheiden, welche in der folgenden Tabelle dargestellt werden [174].

Tabelle 51: Einflussfaktoren zur Berechnung des Belastungsvektors [164]

Gruppe	Gruppenbezeichnung	Aufsummierte Unterkomponenten
PSF ₁	Aufgabentyp	S ₁ = Summe der Zeitanteile t ₁ ...t ₅
PSF ₂	Aufgabencharakteristik	S ₂ = Summe der Zeitanteile c ₁ ...c ₅
PSF ₃	Personalfaktoren	S ₃ = Summe der Zeitanteile p ₁ ...p ₅
PSF ₄	Umgebungsfaktoren	S ₄ = Summe der Zeitanteile e ₁ ...e ₇
PSF ₅	Systemfaktoren	S ₅ = Summe der Zeitanteile s ₁ ...s ₇

Für jeden Einflussfaktor wird ein Summenwert (S₁...S₅) gebildet, der sich aus den einzelnen Zeitanteilen (bei PSF₁) und den einzelnen Gewichtungen (PSF₁ bis PSF₅) zusammensetzt. Die Berechnung der Einflussfaktoren ist im Folgenden im Einzelnen beschrieben und nach BRAUSER (1990) dargestellt [174]:

PSF₁ Aufgabentyp - Ermittlung von S₁ (Summe der Zeitanteile t₁,...,t₅): Die Summe S₁ ergibt sich aus der Standardisierung der Beschreibung der Aufgabenelemente und ihrer Zuweisung zu den fünf Unterkomponenten des Einflussfaktors PSF₁ (Aufgabentyp) sowie aus der Festlegung des Zeitbedarfs t_{ij} jedes Aufgabenelements. Die Zeitwerte sind aus den Tabellen der Standardwörter (vgl. Anhang Tabelle 91) zu entnehmen. Werden in der Aufgabenbeschreibung Zahlen (N) genannt, ist ein Faktor f = N anzusetzen und der Zeitwert des Aufgabenelements um diesen Faktor f zu erhöhen. Es gilt [93], [174]:

$$t_{ij}^* = t_{ij} + f \tag{Gleichung 27}$$

Die Normierung der Zeitwerte t_{ij} auf die festgestellte oder spezifizierte Zeitdauer t_a der Aufgabendurchführung ergibt die relativen Zeitanteile der Unterkomponenten von PSF₁, die Werte t₁...t₅ [174]:

Tabelle 52: Unterkomponenten von PSF₁ [174]

Unterkomponenten von PSF ₁		Relativer Zeitanteil
1	Perzeption (Wahrnehmung)	t ₁ = (t ₁₁ + t ₁₂ + ...t _{1j}) / t _a
2	Detektion	t ₂ = (t ₂₁ + t ₂₂ + ...t _{2k}) / t _a
3	Mentale Verarbeitung	t ₃ = (t ₃₁ + t ₃₂ + ...t _{3l}) / t _a
4	Entscheidung	t ₄ = (t ₄₁ + t ₄₂ + ...t _{4m}) / t _a
5	Handlung	t ₅ = (t ₅₁ + t ₅₂ + ...t _{5n}) / t _a

Die Gesamtzeit t_a ist als Summe aller vorkommenden Zeiten t_{ij} für alle sequenziell angesetzten Aufgabenelemente zu bestimmen [93], [174]:

$$t_a = (t_{11} + t_{12} + \dots + t_{1j}) + (t_{21} + t_{22} + \dots + t_{2k}) + \dots + (t_{51} + t_{52} + \dots + t_{5n}) \quad \text{Gleichung 28}$$

Für rein sequenziell durchgeführte Aufgaben ergibt sich die Summe S_1 mit [93], [174]:

$$S_1 = t_1 + t_2 + \dots + t_5 = 1 \quad \text{Gleichung 29}$$

Neben rein sequenziell aufeinander folgenden Aufgaben gibt es gleichzeitig ablaufende Wahrnehmungs- oder Handlungselemente, was vielfach bei mentalen Operationen der Fall ist. Bei gleichzeitigem Lesen und Identifizieren einer Artikelnummer auf einem Beleg bleibt vor diesem Hintergrund die Zeitdauer t_a unverändert, jedoch tragen die Zeitelemente t_{ij} dieser Aufgabenelemente zu den relativen Zeitanteilen von $t_1 \dots t_5$ bei. Daher erhöht sich lediglich der relative Zeitanteil und es gilt [93], [174]:

$$S_1 > 1 \quad \text{Gleichung 30}$$

Anhand der Komponenten S_1 ist bereits die Mehrbelastung durch die parallelen mentalen Handlungs- und Wahrnehmungselemente bei der Durchführung eines Aufgabenelements zu erkennen, das aus simultan ablaufenden mentalen Prozessen besteht [93].

PSF2 Aufgabencharakteristik - Ermittlung der Anteile c_1 und c_2 der Summe S_2 : Im vorliegenden Abschnitt wird zunächst dargestellt, wie die beiden Unterkomponenten c_1 und c_2 ermittelt werden. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Ansatzes für die übrigen Gewichte (siehe Abschnitt PSF₂ bis PSF₅ - Ermittlung der Summen S_2 bis S_5). Die Gewichtung der Unterkomponenten c_1 (Komplexität) und c_2 (Schwierigkeit) wird ebenfalls durch die standardisierte Aufgabenbeschreibung mit Hilfe der im Anhang dargestellten Tabelle festgelegt (vgl. Anhang Tabelle 92). Die Berechnung der beiden Unterkomponenten erfolgt nach BRAUSER (1990) [174]:

$$c_1 = \frac{m}{15} \quad \text{mit } m = \text{Anzahl aller Aufgabenelemente} \quad \text{Gleichung 31}$$

(für $m > 15$ gilt $c_1 = 1$)

c_2 ist das arithmetische Mittel der Vorgewichtsanteile d_{ij} der j Aktivitäten (Aufgabenelemente) a_{ij} in den i Gruppen ($i = 1, 2, \dots, 5$). Die Vorgewichtsanteile d_{ij} werden wie folgt berechnet:

$$d_{ij} = \frac{t_{ij}}{t_a} * \frac{d_{ij}}{10} \quad \text{Gleichung 32}$$

d_{ijk} ist die Summe der k Vorgewichte d vom Aufgabenelement a_{ij} . Sind in der Aufgabenbeschreibungen Zahlen (N) genannt, so ist das Vorgewicht um den Faktor $f = N$ zu erhöhen:

$$d^* = d + f \quad \text{Gleichung 33}$$

Der Teiler 10 ergibt sich aus dem Bereich der Vorgewichte (0...10). Insgesamt wird c_2 wie folgt ermittelt:

$$c_2 = \sum_{ij} \frac{d_{ij}}{m^*} \quad \text{Gleichung 34}$$

m^* ist die Anzahl aller Aufgabenelemente a_{ij} in zusammengehörenden „Aktivitätsgruppen“ (also den Aktivitäten einer bestimmten Komponente), wobei immer $m^* \leq m$ ist. Wird eine Aktivität der gleichen Art a (z. B. Lesen, Art: W1) n -mal innerhalb einer Aufgabe durchgeführt, so trägt n zu m (Anzahl aller Aufgabenelemente) n -mal bei, zu m^* jedoch nur einmal. Dies wird nach BRAUSER (1990) damit begründet, dass der arithmetische Mittelwert d_{ij} / m zu klein für eine angemessene Gewichtung werden kann, vor allem wenn sehr viele Aufgabenelemente der gleichen Art auftreten [174].

PSF₂ bis PSF₅ - Ermittlung der Summen S₂ bis S₅: Die Gewichtung der übrigen Einflussfaktoren PSF₂ bis PSF₅ ($c_3 \dots c_5$, $p_1 \dots p_5$, $e_1 \dots e_7$, $s_1 \dots s_7$) erfolgt nach Empfehlungen, die in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst sind. Danach erhalten Einflussfaktoren, die nicht wirksam sind, die Gewichtung 0.0 und Faktoren mit einem großen Einfluss den Faktor 1.0. Die Bestimmung der Ausprägungen erfolgt individuell durch den Benutzer des Verfahrens. Im Anhang ist tabellarisch dargestellt, wie die Werte von $c_3 \dots c_5$, $p_1 \dots p_5$, $e_1 \dots e_7$, $s_1 \dots s_7$ bestimmbar sind, vgl. im Anhang Tabelle 92 bis Tabelle 95.

Die Berechnung der Zuordnung der Zuverlässigkeitsklasse ZK und der Fehlerwahrscheinlichkeit HEP ist wie folgt durchzuführen [93], [174]:

Zunächst ist ein Zuverlässigkeitswert K zu bestimmen. Hierzu wird die Summe G der quantitativen Ausprägungen der Einflussfaktoren $S_1 \dots S_5$ gebildet [170]:

$$G = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 \quad \text{Gleichung 35}$$

Nach Ermittlung der Summe der Einzelfaktoren G wird diese in eine logarithmische Funktion eingesetzt und daraus der Zuverlässigkeitswert K gebildet [170]:

$$K = 1,2 * G * \log G * S_1 \quad \text{Gleichung 36}$$

Aus dem Zuverlässigkeitswert wird anschließend die Zuverlässigkeitsklasse ZK, in welche die untersuchte Aufgabe eingeordnet wird, wie folgt bestimmt [170]:

$$ZK = \begin{cases} \text{Integer}(K) & \text{für } K < 10 \\ 10 & \text{für } K \geq 10 \end{cases} \quad \text{Gleichung 37}$$

Durch die Integer-Funktion wird aus jeder reellen Zahl zunächst die nächst kleinere ganze Zahl gebildet. Liegt der Zuverlässigkeitswert über 10 wird immer von einer Fehlhandlungswahrscheinlichkeit von 1.0 (die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit liegt dann bei 100%) ausgegangen [170].

Die Basis zur Klassifizierung der Aufgaben nach der Zuverlässigkeit ihrer Durchführung bildet die Einteilung des Bereichs der Fehlerwahrscheinlichkeit (0 bis 10) in zehn Intervalle mit monoton ansteigender Intervallbreite. Beispielsweise umfasst die „Zuverlässigkeitsklasse 2“ das Intervall zwischen 0.001 und 0.0033. Die Einteilung der ZK-Skala wurde auf andere existierende Skalen zur subjektiven Abschätzung der menschlichen Leistung abgestimmt. Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass kein Mensch fehlerfrei arbeiten kann. Daher wird für die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit bei der Durchführung einer Aufgabe die Untergrenze von 0.0001 angenommen [173].

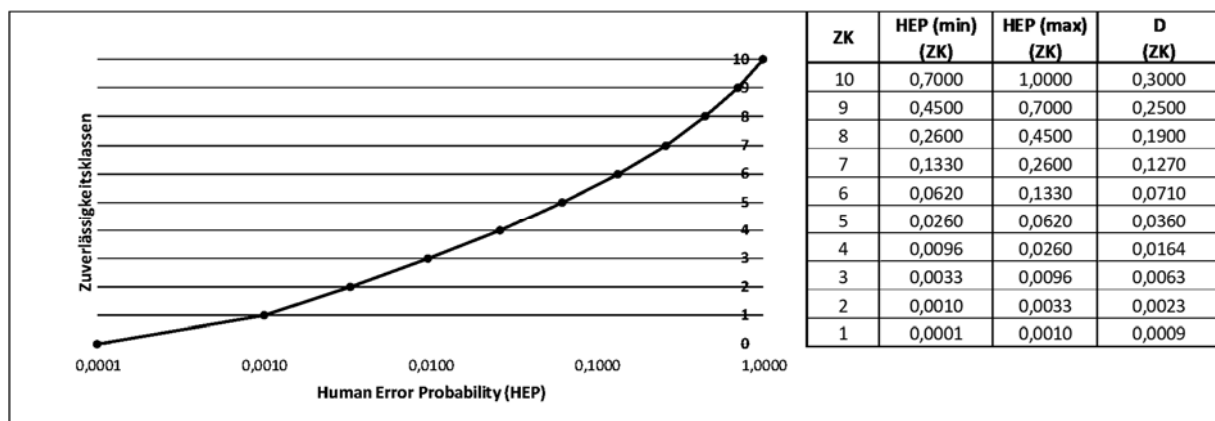


Abbildung 35: Klassifizierung der Aufgaben nach der Zuverlässigkeit [173]

Nach Bestimmung der Zuverlässigkeitsklasse wird die Fehlerwahrscheinlichkeit HEP aus der linearen Interpolation zwischen unterer und oberer Grenze der betrachteten Klasse ZK ermittelt [173]:

$$HEP = Fract(K) * D(ZK) + HEP_{min}(ZK) \tag{Gleichung 38}$$

wobei

$$D(ZK) = HEP_{max}(ZK) - HEP_{min}(ZK), \text{ die Intervallbreite von ZK} \tag{Gleichung 39}$$

Hierbei ist:

$$Fract(K) = K - Integer(K) \tag{Gleichung 40}$$

Das Verfahren ermöglicht es, verschiedene Aufgaben unter Einbeziehung der Durchführungsbedingungen (Belastungen durch Einflussfaktoren) zu analysieren und einer

Zuverlässigkeitsklasse zuzuordnen. Mit Hilfe der Berechnungsvorschriften lässt sich relativ leicht eine Analyse durchführen.

Als Mittel zur Beschreibung der menschlichen Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit werden im Anschluss die ermittelten Wahrscheinlichkeiten (HEP) und Gegenwahrscheinlichkeiten den Regeln des HRA-Ereignisbaums entsprechend genutzt [169], [175].

$$\overline{HEP} = 1 - HEP \quad \text{Gleichung 41}$$

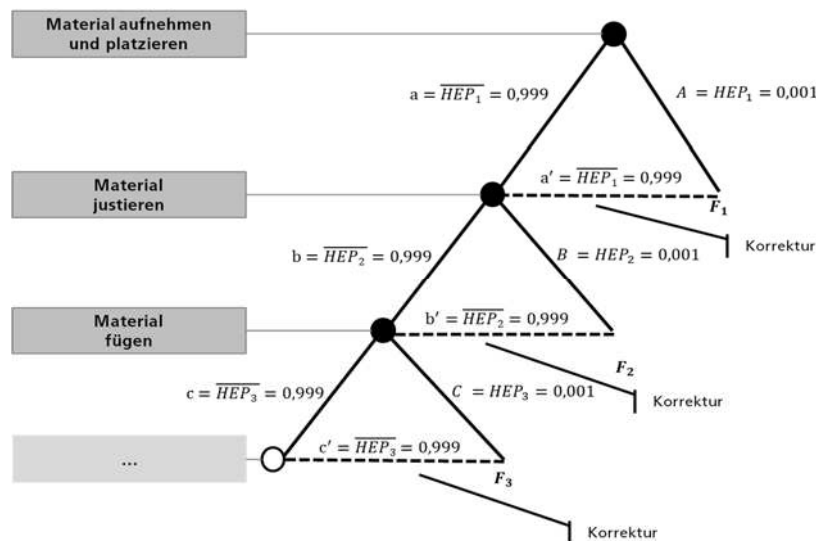


Abbildung 36: Darstellung eines schematischen HRA-Ereignisbaums (eigene Darstellung)

HRA-Ereignisbäume sind eine grafische Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte einer Aufgabe. Auf Grund der hierarchischen Struktur sowie der Tatsache, dass jeder Knoten des Baumes einen binären Entscheidungspunkt repräsentiert, stellen die Bäume eine Kompatibilität zu der Ereignisbaummethodik der Systemrisikoanalyse zur Bewertung technischer Zuverlässigkeit dar. Daher lassen sich die HRA-Ereignisbäume mathematisch formal beschreiben und auswerten. Die großen Buchstaben stellen die Wahrscheinlichkeit dar, dass eine Aufgabe fehlerhaft ausgeführt wird (P), die kleinen Buchstaben stellen die Gegenwahrscheinlichkeit (p) dar. Je nach konstruktiver Ausgangslage besteht die Möglichkeit, fehlerhaft ausgeführte Aufgaben zu korrigieren, was durch den kleinen Buchstaben (p') repräsentiert wird. Auf diese Weise werden unterschiedliche Fehlerpfade aufgezeigt. Im Zuge einer Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit sind die einzelnen Pfade entlang ihrer Pfadmöglichkeiten zu multiplizieren [169], [175]. Um die Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit über alle Fehlerpunkte entlang der Fehlerpfade zu erhalten, sind die Fehlerwahrscheinlichkeiten der einzelnen Fehlerpfade schließlich zu addieren. Ein Beispiel ist in der folgenden Tabelle angeführt.

Tabelle 53: Fehlerpunkte, -wege, -wahrscheinlichkeiten und -endpunktwahrscheinlichkeit
(eigene Darstellung)

Fehlerendpunkt	Fehlerwege	Fehlerwahrscheinlichkeiten	Fehlerendpunktwahrscheinlichkeit
F ₁	A	0,001	10 ⁻³
F ₂	aB Aa'B	9,99 * 10 ⁻⁴ 9,99 * 10 ⁻⁷	9,99 * 10 ⁻³
F ₃	abC aBb'C Aa'Bb'C	9,98 * 10 ⁻⁵ 9,98 * 10 ⁻⁹ 9,98 * 10 ⁻¹⁰	9,98 * 10 ⁻⁵
Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit F_{ges}			1,11 * 10 ⁻³

Im folgenden Abschnitt wird das oben dargestellte HRA-Vorgehensmodell in Hinblick auf Möglichkeiten zur Bestimmung menschlicher Zuverlässigkeit unter Verwendung von Informationen aus der MTM-UAS Analyse untersucht.

KERN & REFFLINGHAUS (2015) formulieren in ihren Arbeiten das Ziel, mittels des oben dargestellten HRA-Vorgehensmodell bereits in frühen Phasen der Produktentstehung Rückschlüsse auf die HEP im Zuge von Montagetätigkeiten zu ziehen. Hierzu entwickelten KERN & REFFLINGHAUS (2015) die Methode MTQM (Methods Time and Quality Measurement), mit der ein quantitativer Rückschluss auf die HEP auf Basis von MTM-1 sowie auf Basis von MTM-UAS Analysen gezogen wird [176], [137], [177]. Im Rahmen der Umsetzung der Aufgabenbeschreibungen in die standardisierte ESAT-Prozesssprache wurden mehrere Schwachstellen festgestellt. Daher wurde die ESAT-Methode hinsichtlich des Verwendungszwecks für den Anwendungsbereich „Manuelle Montage“ durch KERN und REFFLINGHAUS (2015) modifiziert. Die in der ESAT-Datenbank enthaltenen Zeitdaten basieren auf der Zeiterfassung selten durchgeführter Überwachungs- und Kontrollaktivitäten [177] und sind für eine prospektive oder auch evaluierende Betrachtung von Zeiten der Tätigkeitsausführung in der Montage nur bedingt geeignet. Vor diesem Hintergrund wurden die in der ESAT-Datenbank enthaltenen Zeitwerte durch Zeitwerte ersetzt, die mit dem System der vorgegebenen Zeiten MTM (Methods Time Measurement) ermittelbar sind. Da ESAT für die Abbildung von Elementen einer abgebildeten manuellen Montageaufgabe in der ESAT-Prozesssprache oft nicht genügend oder nicht passende Standardbegriffe unterstützt, wurde die ESAT-Datenbank im Zuge der Methodenentwicklung durch KERN und REFFLINGHAUS (2015) um ca. 45 neue montagespezifische Standardbegriffe erweitert, indem Montagetätigkeiten in die einzelnen ESAT Prozessstandards zerlegt wurden und diesen die entsprechenden ESAT Terms zugeordnet worden sind.

Wie oben dargestellt, sind zur Berechnung des Spannungsvektors $G - PSF_1$ (Aufgabentyp), PSF_2 (Aufgabencharakteristik), PSF_3 (Personalfaktoren), PSF_4 (Umweltfaktoren) sowie PSF_5 (Systemfaktoren) zu bestimmen.

Im Anhang gibt Tabelle 96 einen Überblick, welche der Berechnungsgrößen sich aus einer MTM-UAS Analyse ermitteln lassen. Aus der Tabelle geht hervor, dass komplexe Berechnungsparameter automatisch mit MTM-UAS Analysen bestimmbar sind. Die weiteren Berechnungsparameter sind manuell zu definieren. Auf diese Weise lassen sich die weiteren Rechenschritte ausführen:

Tabelle 54: Berechnungsschritte zur Bestimmung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit (eigene Darstellung)

Berechnungsschritt	Berechnungsformel	Anmerkung
Zuverlässigkeitswert K	$K = 1,2 * G * \log G * S_1$	Wenn Spannungsvektor G bekannt ist, kann K berechnet werden
Zuverlässigkeitsklasse ZK	$ZK = \begin{cases} Integer(K) & \text{für } K < 10 \\ 10 & \text{für } K \geq 10 \end{cases}$	Wenn K bekannt ist, kann die Zuverlässigkeitsklasse bestimmt werden
Differenz HEP_{max} und HEP_{min}	$D(ZK) = HEP_{max}(ZK) - HEP_{min}(ZK)$	Werte sind der Abbildung 35 zu entnehmen.
Fract (K)	$Fract(K) = K - Integer(K)$	Wenn Zuverlässigkeitswert bekannt ist, kann Fact (K) berechnet werden
HEP	$HEP = Fract(K) * D(ZK) + HEP_{min}(ZK)$	Wenn Fact (K), D (ZK) und $HEP_{min}(ZK)$ bekannt sind, kann HEP berechnet werden.

Basierend auf Studienergebnissen von KERN und REFFLINGHAUS (2015) gilt es, die Berechnung des Zuverlässigkeitswertes K wie folgt zu modifizieren [178]:

$$K = 1,2 * 0,035G * \log 0,035 G * S_1 \tag{Gleichung 42}$$

Die auf diese Weise ermittelbaren Einzelwahrscheinlichkeiten menschlicher Fehler sind anschließend nach der oben aufgeführten HRA-Ereignisbaummethode zu berechnen. Auf diese Art ist die HEP für jeden Tätigkeitsschritt, für Tätigkeitssequenzen (Montagesequenzen) und auch für Montagestationen oder für ganze Montagelinien berechenbar.

7.3.3 Einflüsse digitaler Assistenzsysteme auf menschliche Fehler

DAS nehmen Einfluss auf die HEP, in dem entsprechende Systeme dazu beitragen, dass der Werker die richtigen Informationen für die richtige Tätigkeitsausführung erhält [10], [12]. Damit ist jedoch nicht garantiert, dass der Werker die Tätigkeit tatsächlich korrekt ausführt. Daher muss der Tätigkeitsverlauf im Hinblick auf eine Übereinstimmung von Soll-Verlauf und Ist-Verlauf abgesichert werden. Auf diese Weise wird die HEP reduziert, dem Auftreten von Fehlern vorgebeugt und werden daraus resultierende Fehler des Produkts verhindert. Für den Fall, dass ein menschlicher Fehler gemacht worden ist, weisen DAS darauf hin, wie dieser Fehler zu korrigieren ist, um etwaige Fehlerkosten zu vermeiden [12]. Darunter sind zum einen rein manuelle Tätigkeiten, zum anderen aber auch Tätigkeiten, welche durch den Werker unter Zuhilfenahme von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen durchgeführt werden, zu verstehen.

In Bezug auf die Morphologie DAS wird zum einen die Subkategorie der DAS Komponenten Input-Information als auch die Subkategorie der DAS Komponenten Input-/Output-Tool-Information adressiert (vgl. Kapitel 5.1.1). Beide Kategorien sorgen dafür, dass Informationen über reale Tätigkeitsverläufe dem DAS Informationssystem zu Verfügung gestellt werden, um einen Abgleich zwischen dem Soll-Tätigkeitsverlauf und dem Ist-Tätigkeitsverlauf vorzunehmen. Auf diese Art ist es im Falle von Abweichungen möglich, entsprechend zu reagieren. In Bezug auf die Integration von Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen entsprechend der Kategorie Input-/Output-Tool-Information ist auch das Einwirken dieser Komponenten auf HEP durch automatisierte Parametrisierung anzuführen. Es wird angenommen, dass sich der Einfluss auf die HEP auf die drei Informationskategorien (Informationsrückmeldungen vom physischen Arbeitssystem in das Informationsverarbeitungssystem), welche durch integrierte Sensorik in der Montageperipherie möglich sind, erstreckt. Die Annahmen basieren auf Grund fehlender Kenntnisse im wissenschaftlichen Diskurs auf Beobachtungen in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0. (FFG. Nr. 852105 und Nr. 852103).

- Eine Rückmeldung erfolgt über sensorische Kopplungssysteme, dass die Tätigkeit durchgeführt wurde (Ausführungsrückmeldung).
 - Es wird der Annahme gefolgt, dass die Informationsrückkopplung die im finalen Produkt resultierende HEP um 10 Prozent reduziert (Annahme).
 - Entsprechende Sensorik meldet ausschließlich das Ende eines Tätigkeitsprozesses zurück: Tätigkeit wurde ausgeführt.
 - Über die Ausführungsqualität werden keine Informationen generiert. Die meisten dieser Systeme sind durch den Menschen leicht zu überlisten.
- Eine Rückmeldung erfolgt über sensorische Kopplungssysteme, dass die Tätigkeit nach der richtigen Arbeitsanweisung (Ausführungsqualität) durchgeführt wurde.
 - Es wird der Annahme gefolgt, dass die Informationsrückkopplung die im finalen Produkt resultierende HEP um 40 Prozent reduziert (Annahme).
 - Entsprechende Sensorik ist darauf ausgelegt, die kinematische Bewegung des Werkers zu erfassen.
 - Ein Abgleich der Bewegungsfolgen mit zuvor definierten Soll-Bewegungsfolgen ermöglicht eine Identifikation, ob der Werker auch nach der vorgeschriebenen Arbeitsmethode / -anweisung agiert hat.

- Eine Rückmeldung erfolgt über sensorische Kopplungssysteme, dass die Tätigkeit mit den richtigen Materialien, Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen durchgeführt wurde (Ausführungsqualität).
 - Es wird der Annahme gefolgt, dass die Informationsrückkopplung die im finalen Produkt resultierende HEP um 50 Prozent reduziert (Annahme).
 - Entsprechende Sensorik ergänzt Sensoriken zur Informationsgenerierung über die Arbeitsanweisung, in dem diese Sensoriken zusätzliche Informationen über das zu verwendende Material und die Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge erfassen.
 - Tätigkeit wurde mit den Materialien, Baugruppen, Hilfs- und Betriebsmitteln durchgeführt. Die richtigen Materialien, Baugruppen, Hilfs- und Betriebsmittel wurden an den richtigen Montagestellen verwendet.

In Tabelle 55 werden die entsprechenden Sensoriken ihrem Einfluss entsprechend, entlang der oben aufgezeigten Informationskategorien dargestellt. Der angenommene Gesamteinfluss auf eine Montagetätigkeit wird summiert dargestellt. Die Annahmen basieren auf Grund fehlender Kenntnisse im wissenschaftlichen Diskurs auf Beobachtungen in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0. (FFG. Nr. 852105 und Nr. 852103).

Tabelle 55: Regelwerk – Gesamteinfluss auf eine Montagetätigkeit (Annahme) (eigene Darstellung)

Im Informationssystem wird folgendes erfasst	Einfluss auf HEP	Sprache (Voice)	Button	Barcode	Näherungssensor	RFID
Rückmeldung, Tätigkeit wurde durchgeführt	25,00%	1	1	1	1	1
Rückmeldung, Tätigkeit wurde nach Arbeitsmethode durchgeführt	25,00%	0	0	0	1	0
Rückmeldung, Tätigkeit wurde mit den richtigen Materialien / Werkzeugen / ... durchgeführt	50,00%	0	0	0	0	0
Summe - Einfluss HEP	100,00 %	25,00 %	25,00 %	25,00%	50,00%	25,00%
Im Informationssystem wird folgendes erfasst	Einfluss auf HEP	RFID (automatisch)	Hand Lokal Positioning Tracking	Tool Lokal Positioning Tracking	Kamera	Gestik (=Kamera)
Rückmeldung, Tätigkeit wurde durchgeführt	25,00%	1	1	1	1	1
Rückmeldung, Tätigkeit wurde nach Arbeitsmethode durchgeführt	25,00%	0	1	1	1	1
Rückmeldung, Tätigkeit wurde mit den richtigen Materialien / Bauteilen / Werkzeugen / ... durchgeführt	50,00%	0	0,5	1	0,5	0,5
Summe - Einfluss HEP	100,00 %	25,00 %	75,00 %	100,00%	78,00%	75,00%

Die dritte Informationskategorie betrifft die richtige Ausführung mit den richtigen Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen in der richtigen Art und Weise. Die Informationskategorie liefert keinen Hinweis darauf, dass die technische Funktion der Hilfs-,

Betriebsmittel und Werkzeuge richtig erfolgt ist. Da hier eine HEP in der Handhabung anzunehmen ist, leisten intelligente Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge einen zusätzlichen Beitrag zur Reduktion der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit. Dies kann dadurch realisiert werden, indem Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge über eine datentechnische Integration mit den richtigen Einstellungsparametern der auszuführenden Arbeitsaufgabe entsprechend versorgt werden. Bei Gewährleistung der Funktionalitäten der Systeme ist hier eine Reduktion von 100 Prozent der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit anzunehmen. Die Annahmen basieren auf Grund fehlender Kenntnisse im wissenschaftlichen Diskurs auf Beobachtungen in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0. (FFG. Nr. 852105 und Nr. 852103) und Aussagen von Herstellern, wie Bosch Rexroth (2019) [179]. Folgende Tabelle verdeutlicht die Annahmen auf Basis von MTM-UAS Aufbaustufen, bei welchen Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeuge verwendet werden, in Ergänzung mit Halb-Automaten:

Tabelle 56: Regelwerk – Reduktion HEP durch Integration von Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge (Annahme) (eigene Darstellung)

Einfluss auf HEP in Prozent	Schraubsystem	Messsystem	Markierungssystem	Verspannungssystem	Reinigungssystem	Robotik System
	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	Klebesystem	Halb-Automat	Verpackungssysteme	Leitungen montieren	Normteile montieren	...
100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	...

7.3.4 Fazit

Kapitel 7.3 verdeutlicht eine Methode zur Quantifizierung der HEP nach KERN und REFFLINGHAUS (2015) [178]. Nach einer grundlegenden Begriffsdefinition HEP und einer Darstellung zentraler Einflussfaktoren auf die HEP in der Montage, ist eine mathematische Vorgehensweise zur Bestimmung HEP nach KERN und REFFLINGHAUS (2015) dargestellt wurden. Die Methode von KERN und REFFLINGHAUS (2015) basiert auf Informationsgrundlagen einer MTM-UAS Analyse [178]. Es wurde verdeutlicht, dass im Zuge einer Quantifizierung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit durch eine erweiterbare MTM-UAS Analyse alle benötigten Informationen zu gewinnen sind. Manuell sind ausschließlich die „Performance Shape Faktoren“ festzulegen. Auf Basis der entwickelten Morphologie (vgl. Kapitel 5.1.1) erfolgte abschließend eine Darstellung eines Regelwerks unter Verwendung verschiedener Annahmen, in welcher Form entsprechende Komponenten DAS Einfluss auf die HEP nehmen.

Das Kapitel verdeutlicht, dass es mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM gelingt, Einflüsse DAS auf menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit quantitativ zu bestimmen und Verknüpfungen, Verbindungsmöglichkeiten und

-anforderungen (Regelwerk) zwischen dem Beschreibungsparameter menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit und verbundenen Komponenten DAS herzustellen. Ein Regelwerk beschreibt diese Zusammenhänge (vgl. Tabelle 55 und Tabelle 56). Die Zusammenfassung des Regelwerks ist im Anhang der Tabelle 99 - Tabelle 104 zu entnehmen.

7.4 Zusammenfassung

Kapitel 7 verdeutlicht und beschreibt drei zentrale Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseinflussfaktoren DAS in der Montage: Die Ausführungszeit, die Einlern- und Trainingszeit sowie die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit. Zu den drei Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseinflussfaktoren sind in diesem Kapitel auf Basis vorliegender Modelle und Methoden zur Quantifizierung des resultierenden Einflusses auf die Gesamtbearbeitungszeit (Ausführungszeit) eines vorgegebenen Produktionsprogramms Beschreibungsmodelle und -methoden aufgezeigt und analysiert worden. Mit diesen Modellen und Methoden ist es möglich, quantitative Zeiteinflüsse auf Ausführungszeiten von Montagetätigkeiten zu ermitteln. Dabei folgen die Modelle und Methoden einer mathematischen Beschreibung [33], [88], [137], [176], welche auf Grundlage vorhandener und erweiterter MTM-UAS Analysen formal beschreibbar und quantifizierbar ist. Die in Kapitel 5.1 aufgezeigten DAS Komponenten und die damit verbundenen Funktionen wurden in Bezug auf ihre Einflüsse der gesamten Montage-Ausführungszeit zugeordnet.

Im Zuge einer Quantifizierung der Einflüsse DAS auf die Ausführungszeit wurde in Kapitel 7.1 eine Beschreibung der Einflüsse auf eine papiergebundene Auftragsinformationshandhabung und den damit verbundenen Zeitaufwand, auf Dokumentationszeiten, Such-, Kommunikations- und Abstimmungszeiten sowie auf den Zeitaufwand für die Konfiguration von klassischen, bei der Ausführung von Montagetätigkeiten benötigten Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeuge dargestellt. Darüber hinaus wurden im Hinblick auf Einflüsse auf die Ausführungszeit unterschiedliche Informationsrepräsentationsformen der in Kapitel 5.1.1 entwickelten Morphologie entsprechend beschrieben. Die Beschreibung erfolgte dabei auf Basis einer MTM-UAS Analyse entsprechenden Bezugsgrößen als Multiplikator. Die Beschreibung der Einflüsse erfolgte auf getroffenen Annahmen. Diese Annahmen sind in diesem Kapitel dargestellt und in ein formales Regelwerk übertragen worden. Zur Quantifizierung von Einlern- und Trainingszeiten wurden in Kapitel 7.2 die Begriffe definiert und die Einflüsse und Einflussfaktoren beschrieben. Im Folgenden wurde eine Methode und darauf aufbauend ein Modell dargestellt, mit deren Anwendung es möglich ist, eine Lernkurve auf Basis un-

terschiedlicher Tätigkeitsausführungen zu erzeugen. Die von JESKE (2013) entwickelte Methode basiert auf Informationen aus MTM-UAS Analysen mit der Möglichkeit, entsprechende quantifizierte Aussagen zu Einlern- und Trainingszeiten zu treffen [33]. Auf der Grundlage von Beobachtungsstudien, welche in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 durchgeführt worden sind, wurden Erkenntnissen zu unterschiedliche Informationsrepräsentationsformen dargestellt. Darauf aufbauend wurde ein Regelwerk zum Einfluss unterschiedlicher Informationsrepräsentationsformen DAS auf Einlern- und Trainingszeiten aufgestellt. Abschließend wurde in Kapitel 7.3 eine Methode zur Quantifizierung der HEP nach KERN und REFFLINGHAUS (2015) dargestellt [178]. Nach einer Begriffsdefinition HEP und einer Darstellung zentraler Einflussfaktoren auf die HEP in der Montage, ist die Methode und Bestimmung HEP nach KERN und REFFLINGHAUS (2015) dargestellt worden. Ebenso wie die Methode von JESKE (2013) [33] basiert auch die Methode von KERN und REFFLINGHAUS (2015) auf Informationsgrundlagen einer MTM-UAS Analyse [178]. Es wurde verdeutlicht, dass im Zuge einer Quantifizierung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit durch eine erweiterbare MTM-UAS Analyse alle benötigten Informationen zu gewinnen sind. Manuell sind ausschließlich die „Performance Shape Faktoren“ festzulegen. Auf Basis der Morphologie erfolgte abschließend eine Darstellung eines Regelwerks unter Verwendung verschiedener Annahmen, in welcher Form entsprechende Komponenten DAS Einfluss auf die HEP nehmen.

Das Kapitel verdeutlicht, dass quantifizierbare Einflüsse, Verbindungsmöglichkeiten und -anforderungen von Komponenten DAS mit den in dieser Arbeit fokussierten organisatorischen Zielsetzungen DAS mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM. Dabei sind Einflüsse DAS auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte mittels einer erweiterten MTM-UAS Analyse beschreibbar und unterschiedliche DAS Komponenten mit Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten verknüpfbar. Die getroffenen Annahmen folgen Erkenntnissen, welche in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 (FFG: Nr. 852103) ermittelt worden sind. Die Tatsache, dass dabei eine Empirie nicht gegeben ist, stellt eine Schwäche der entwickelten Regelwerke dar. Die Möglichkeit, dass die Annahmen auf Grund der Tabellenstruktur änderbar sind, verdeutlicht die grundlegende Veränderbarkeit des Regelwerks, beispielsweise durch Erkenntnisse weiterer Studien- und Beobachtungsanalysen. Die Zusammenfassung des Regelwerks ist im Anhang der Tabelle 99 - Tabelle 104 zu entnehmen. Auf Grundlage des im Anhang in Tabelle 99 - Tabelle 104 angeführte tabellarische Regelwerk ermöglicht es, eine Ausgangssituation (ohne DAS) mit einer Sollsituation (mit DAS) im Hinblick auf die Veränderungsmöglichkeiten der Ausführungszeit,

Einlern- und Trainingszeit sowie der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit verglichen werden. Die Division eines notwendigen Investitionsvolumens DAS durch die möglichen, zu erzielenden positiven Einsparungseffekten von Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit sowie der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit – im Ist-Soll-Vergleich, gemessen in Zeiteinheiten und multipliziert mit Mitarbeiterkosten, ermöglicht es, eine grundlegende Return-on-Investment Betrachtung durchzuführen. Die entsprechenden Formulierungen sind im Folgenden Kapitel beschrieben. Abbildung 37 verdeutlicht die zentralen Ergebnisse dieses Kapitels.



Abbildung 37: Ergebnisse von Kapitel 7 (eigene Darstellung)

Die dritte und damit die in den vorangegangenen Kapiteln nicht betrachtete Schnittmenge des MTO-Konzeptes – Technik-Organisation – wird in diesem Kapitel berücksichtigt. Es wird dargestellt, dass die Möglichkeit besteht, den aus Unternehmenssicht geforderte Mehrwert DAS in Form von quantifizierbaren Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte (Organisation) mit einzelnen technischen Komponenten DAS (Technik) zu verbinden. Die Quantifizierung ist dabei auf Grundlage mittels direkten, indirekten und erweiterten Informationen der Methode MTM möglich.

8 Konzeption und Formulierung des Vorgehensmodells

Die drei Schnittmengen des MTO-Konzeptes wurden im Hinblick auf die Schnittmenge Mensch-Technik in Kapitel 5, in Bezug auf die Schnittmenge Mensch-Organisation in Kapitel 6 und im Zusammenhang mit der Schnittmenge Technik-Organisation in Kapitel 7 aufgezeigt. In diesem Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse der betrachteten drei Schnittmengen im Rahmen der Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS zusammengefasst, welche eine Betrachtung individueller Leistungsmerkmale von Werkern und betriebswirtschaftlicher Produktivitätseffekte bei individuellen Montagetätigkeiten in einem komplexen Montagesystem berücksichtigt.

Hierzu werden initialisierend die grundlegenden Schritte des Vorgehensmodells aufgezeigt und die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf quantifizierbare Wirkzusammenhänge, Anhängigkeiten und Einflüsse dargestellt. Auf dieser Grundlage erfolgt anschließend eine mathematische Formulierung des Vorgehensmodells. Diesbezüglich werden einleitend alle für die mathematische Formulierung des Vorgehensmodells benötigten Beschreibungsgrößen zusammenfassend dargestellt und ganzheitlich auf Informationsdaten hin analysiert, die aus den Grundelementen sowie aus den Aufbau- und Abbaustufen der Methode MTM-UAS zur Berechnung identifizierbar sind, ebenso wie im Hinblick auf Informationsdaten, welche zusätzlich zur Planung und Evaluierung DAS benötigt werden. Darauf aufbauend wird ein Optimierungsproblem zur Selektion und Auswahl Komponenten DAS dargestellt. Das Optimierungsproblem wird hierbei zunächst durch eine mathematische Formulierung der Nebenbedingungen dargestellt, welche es zu befolgen gilt, um eine Funktionsfähigkeit des zu identifizierenden DAS zu gewährleisten. Daran anschließend erfolgt eine Darstellung und Formulierung der Zielfunktion, welche die Selektion und Auswahl Komponenten DAS im Hinblick auf zu erzielende Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte DAS in der Montage beschreibt. Nachdem Nebenbedingungen und Zielfunktion dargestellt und formuliert worden sind, werden Lösungsverfahren aufgezeigt und im Hinblick auf Effizienz und Effektivität zur Lösung des Optimierungsproblems analysiert.

Im Anschluss erfolgt eine kritische Reflexion des entwickelten Vorgehensmodells. Dabei wird das Modell auf Vor- und Nachteile sowie auf Schwachstellen überprüft und Maßnahmen aufgezeigt, wie Vorteile zu maximieren und Nachteile zu minimieren sind. Abbildung 38 veranschaulicht den strukturellen Aufbau dieses Kapitels.

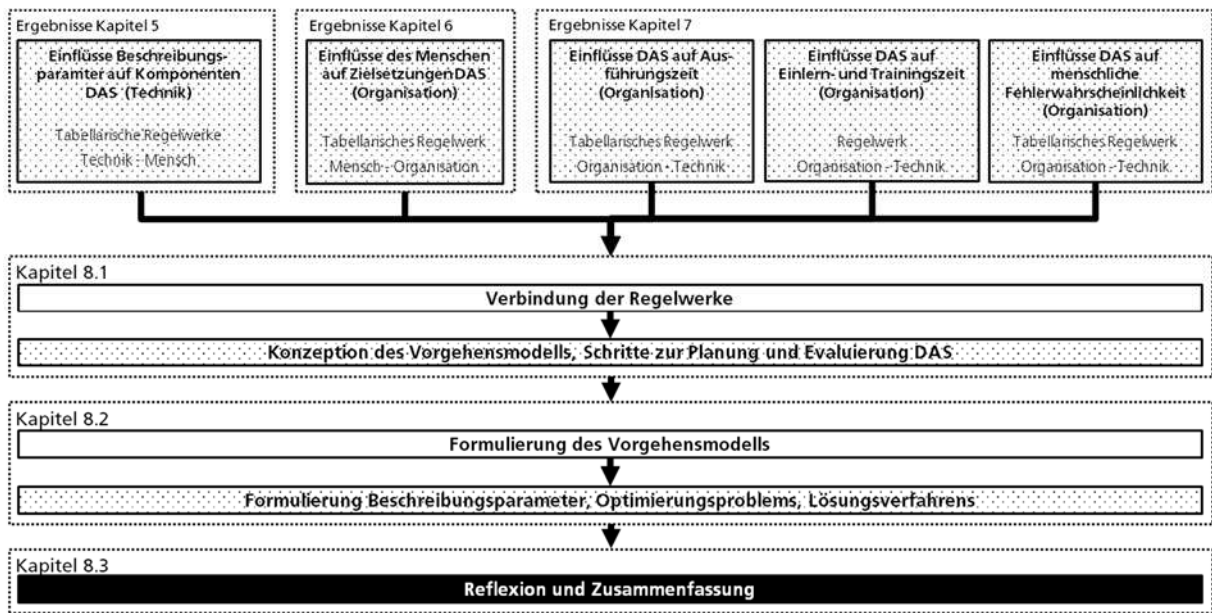


Abbildung 38: Struktureller Aufbau von Kapitel 8 (eigene Darstellung)

8.1 Konzeption des Vorgehensmodells

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Kapiteln 5, 6 und 7 erfolgt im Folgenden die Konzeption des Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage.

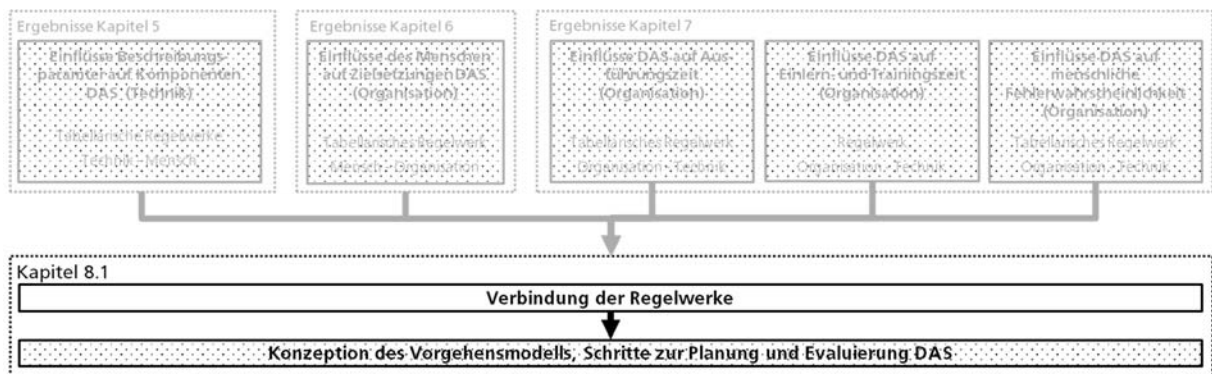


Abbildung 39: Struktureller Aufbau von Kapitel 8.1 (eigene Darstellung)

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln verdeutlicht und der Zielsetzung dieser Arbeit entsprechend, ist eine MTM-UAS Analyse als zentrale Inputinformation zu verwenden, welche im Anhang in Tabelle 105 exemplarisch dargestellt ist. Die dargestellte MTM-UAS Analyse ist im Zuge der Bestimmung der in Kapitel 5.1 aufgezeigten Beschreibungsparameter und deren Tendenzkennzahlen um Informationen sowohl zum Material- beziehungsweise Baugruppentnahmestort und zum -verbauungsort, als auch in Bezug auf zu verwendende Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge ergänzt. Darüber hinaus ist jede in der MTM-UAS Analyse dargestellte Arbeitsmethode einem

Produkt und einer entsprechenden Produktvariante, sowie einer Montagestation und Gesamt-Montage-Linie zuzuordnen.

Um die Ausgangssituation zu bestimmen, ist in einem ersten Schritt die erweiterte MTM-UAS Analyse zu analysieren, um die menschliche Ausführungszeit (im Folgenden als MTMA bezeichnet) entsprechend einer Zuordnung nach Montagearbeitsplatz und Gesamt-Montage-Linie zu bestimmen. Darüber hinaus sind auf Basis eines festzulegenden Werker-Profiles die werker- beziehungsweise teamspezifischen Angaben (vgl. Kapitel 7.2) zur Erhebung der Einlern- und Trainingszeit (im Folgenden als LEARNA bezeichnet) sowie zur Erhebung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit (im Folgenden als HEPA bezeichnet) die Performance Shaping Faktoren (vgl. Kapitel 7.3) anzugeben. Ergänzt mit Informationen zum Produktionsprogramm (Informationen in Bezug auf die Anzahl der zu fertigenden Produkte, Produktvarianten und zur Verfügung stehender Produktionstage) wird die Ausgangssituation (MTMA, LEARNA und HEPA) ermittelt. Darüber hinaus sind Informationen zu durchschnittlichen Personalkostensätzen von Werkern und IT-Mitarbeitern, welche zur Implementierung und Administration DAS befähigt sind, bereitzustellen. Die ermittelten Daten dienen als Vergleichsgrundlage, um eine entsprechende Ausgangssituation ohne DAS mit der zu erzielenden Soll-Situation unter Einsatz eines betriebswirtschaftlich- und werkergerechten DAS zu vergleichen und Aussagen über die Vorteilhaftigkeit im Hinblick auf eine Investitionsentscheidung zur Implementierung eines DAS in der Montage zu treffen.

Der zweite Schritt richtet sich auf die Quantifizierung der Beschreibungsparameter DAS. Durch Analyse der Informationsinhalte der erweiterten MTM-UAS Analyse werden die Beschreibungsparameter Mobilitätsgrad (DM), kognitive Werkerbelastung (CWL), Flexibilitätsgrad (DF), Informationsquellen (IS), Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP), Zugang zur Werkerinformation (AWI), reale versus virtuelle Informationsdarstellung (RvV), Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD) und Möglichkeit zur Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeuge (IA) bestimmt. Die Bestimmung erfolgt auch hier sowohl auf Ebene der Montagestation (einzelner Montagearbeitsplatz) als auch auf der Ebene der Gesamt-Montage-Linie. Zur Bestimmung der Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA) sind an dieser Stelle Angaben durch die Werker beziehungsweise durch das Team zu machen.

Im dritten Schritt erfolgt eine Vorselektion der unterschiedlichen Komponenten DAS an Hand der definierten Beschreibungsparameter und deren technischer Eignung, auf Basis der definierten Tendenzkennzahlen, entlang der einzelnen Technologie-Pools D, T, TS, IR und II (vgl. Kapitel 5.3 und Tabelle 108 im Anhang). Die Vorselektion

(PRESELECTION) erfolgt dabei auf Basis einer Ermittlung des minimalsten Delta zwischen den ermittelten Beschreibungsparametern sowie deren Tendenzkennzahlen und der den Komponenten zugeordneten Tendenzkennzahlen.

Im vierten Schritt erfolgt eine Bewertung der einzelnen vorselektierten Komponenten DAS hinsichtlich ihrer Einflüsse auf die Ausführungszeit (MTME), die Einlern- und Trainingszeit (LEARNE), die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit (HEPE) und hinsichtlich des damit verbundenen Investitionsaufwands (INVEST). Die Tabelle 99 - Tabelle 104 im Anhang zeigen die entsprechenden Einflüsse auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 7 auf und verdeutlichen die Investitionserfordernisse auf Basis von Kapitel 5. Hinsichtlich der im ersten Schritt zu Grunde gelegten Informationen zum Produktionsprogramm erfolgt eine Quantifizierung der gesamten Ausführungszeit (MTME), der gesamten Einlern- und Trainingszeit (LEARNE) sowie der gesamten menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit (HEPE).

Nachdem im vierten Schritt die vorselektierten Komponenten DAS in Bezug auf deren Einfluss auf MTME, HEPE, LEARNE sowie im Hinblick auf INVEST bewertet wurden, erfolgt im fünften Planungsschritt eine iterative Auswahl der Komponenten eines DAS. Während im dritten Planungsschritt die Komponenten vor allem auf menschenorientierten Beschreibungsparametern ausgerichtet bewertet und selektiert worden sind, wird in diesem Planungsschritt das Hauptaugenmerk auf betriebswirtschaftliche Auswirkungen und Einflüsse gelegt. Auf Basis anzugebener Personalkosten erfolgt eine monetäre Bewertung der vorselektierten Komponenten DAS. Anschließend werden alle Kombinationsmöglichkeiten der Komponenten in Bezug auf einen resultierenden monetären Rückfluss verglichen. Auf Basis des höchsten monetären Rückflusses werden die Komponenten ausgewählt. Die Funktion wird durch eine vereinfachte Amortisationsrechnung [180] beschrieben, in welcher die Summe aller Anschaffungsausgaben (Investitionen) der einzelnen Komponenten DAS in Geldeinheiten bewertet und durch deren auf die Zeiteinheit von einem Jahr berechneten, zu erwartenden Rückfluss in Geldeinheiten (hier: Euro) dividiert wird. Dabei erfolgt die Betrachtung auf Montagearbeitsplatzebene sowie auf der Ebene der gesamten Montagelinie. Je nach Montageprinzip, von der Einzelplatzmontage, an welcher die Möglichkeit besteht, an jedem einzelnen Arbeitsplatz ein spezifisches DAS vorzusehen, bis hin zur One-Piece-Flow Montage, bei welcher jeder Werker durch ein eigenes DAS, beziehungsweise Device, geleitet wird. Dabei gelten folgende Nebenbedingungen, um eine ganzheitliche Funktionsfähigkeit des DAS zu gewährleisten:

T-Pool: Alle vorselektierten Komponenten ($T_a, \dots, T_\infty, a \in \mathbb{N}$) werden einbezogen.

- Keine geltende Rahmenbedingung auf die Anzahl der Komponenten.
- Die Komponente / die Komponenten, welche einen betriebswirtschaftlichen Vorteil durch den monetären Rückfluss eines ganzheitlichen DAS liefert/liefern, wird / werden ausgewählt.

D-Pool: Alle vorselektierten Komponenten ($D_b, \dots, D_\infty, b \in \mathbb{N}$) werden einbezogen.

- Die Auswahl einer technischen Komponente für einen Montagearbeitsplatz oder einer technischen Komponente für die Gesamtmontagelinie ist möglich.
- Die Komponente / die Komponenten, welche einen betriebswirtschaftlichen Vorteil durch den monetären Rückfluss eines ganzheitlichen DAS liefert/liefern, wird / werden ausgewählt.

TS-Pool: Alle vorselektierten Komponenten ($TS_c, \dots, TS_\infty, c \in \mathbb{N}$) werden einbezogen.

- Die Auswahl einer Komponente für einen Montagearbeitsplatz oder einer technischen Komponente für die Gesamtmontagelinie ist möglich.
- Die Komponente / die Komponenten, welche einen betriebswirtschaftlichen Vorteil durch den monetären Rückfluss eines ganzheitlichen DAS liefert/liefern, wird / werden ausgewählt.

IR-Pool: Alle vorselektierten Komponenten ($IR_d, \dots, IR_\infty, d \in \mathbb{N}$) werden einbezogen.

- Die Auswahl einer Komponente bzw. Informationsrepräsentationsform für einen Montagearbeitsplatz oder für die Gesamtmontagelinie ist möglich.
- Die Komponente der Informationsrepräsentationsform Text ist alleinstehend oder in Kombination mit Signal, Bild, Animation, Video und Augmented Reality möglich.
- Die Komponente bzw. Informationsrepräsentationsform Interaktionssignal kann ausschließlich ergänzend gewählt werden, wenn eine Komponente aus dem T-Pool gewählt wurde.
- Die Anzahl der Komponenten bzw. der Informationsrepräsentationsform Interaktionssignal ist äquivalent zu der Anzahl gewählter Komponenten des T-Pools.

- Die Komponente / die Komponenten, welche einen betriebswirtschaftlichen Vorteil durch den monetären Rückfluss eines ganzheitlichen DAS liefert/liefere(n), wird / werden ausgewählt.

II-Pool: Alle vorselektierten Komponenten ($II_e, \dots, II_\infty, e \in \mathbb{N}$) werden einbezogen.

- Die Auswahl einer Komponente beziehungsweise einer Informationsrepräsentationsform für einen Montagearbeitsplatz oder einer Komponente beziehungsweise einer Informationsrepräsentationsform für die Gesamtmontagelinie ist möglich.
- Die Komponente / die Komponenten, welche einen betriebswirtschaftlichen Vorteil durch den monetären Rückfluss eines ganzheitlichen DAS liefert/liefere(n), wird / werden ausgewählt.

IP-Pool: Der Technology-Readiness Level ($IP_f, \dots, IP_\infty, f \in \mathbb{N}$) ist schlussendlich auf Basis der selektierten Komponenten aus T-, D-, TS-, IR- und II-Pool zu bestimmen.

- TRL 1-4: Dieses Technology-Readiness-Level ist zu wählen, wenn eine oder auch mehrere Komponenten des T-Pool selektiert worden sind und / oder, wenn aus dem TS-Pool die Komponenten Hand-Local-Positioning, Tool-Local-Positioning und / oder Task Detection via Camera selektiert worden sind.
- TRL 5-7: Dieses Technology-Readiness-Level ist zu wählen, wenn keine Komponenten des T-Pool selektiert worden sind und / oder, wenn aus dem TS-Pool die Komponenten Hand-Local-Positioning, Tool-Local-Positioning und / oder Task Detection via Camera nicht selektiert worden sind und / oder wenn aus dem II-Pool die Komponenten Integration (ERP/MES) oder Business Process Modeling selektiert worden sind.
- TRL 8-9: Dieses Technology-Readiness-Level ist zu wählen, wenn das Technology-Readiness-Level 1-4 (TRL 1-4) oder das Technology-Readiness-Level 5-7 (TRL 5-7) nicht zutreffen.

Abbildung 40 verdeutlicht die einzelnen Schritte des aufgezeigten Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS.

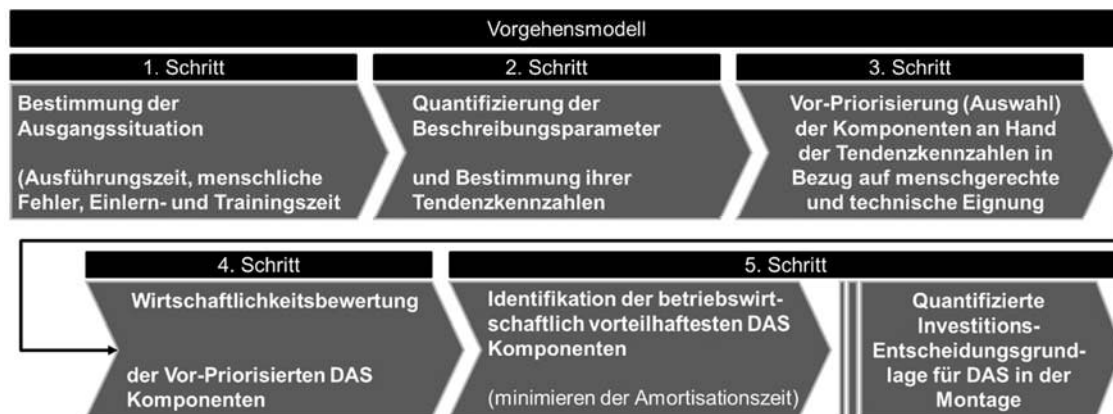


Abbildung 40: Fünf Schritte des Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS (eigene Darstellung)

8.2 Formulierung des Vorgehensmodells

Bezugnehmend auf die in Kapitel 8.1 entwickelten fünf Schritte des Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS erfolgt in diesem Kapitel eine Formalisierung des Vorgehensmodells in Form einer mathematischen Formulierung.

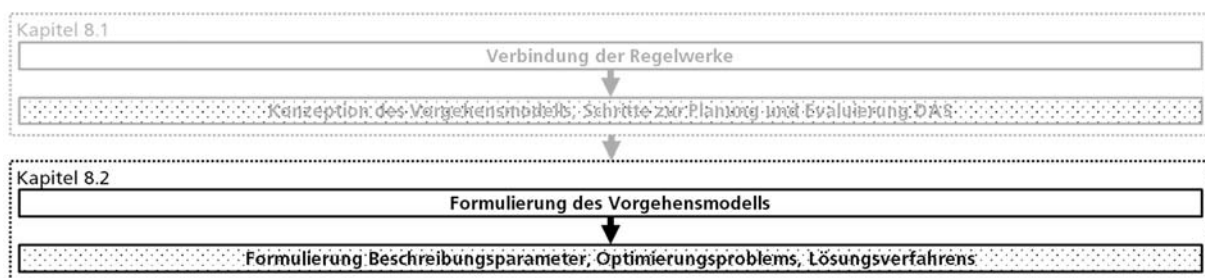


Abbildung 41: Struktureller Aufbau von Kapitel 8.2 (eigene Darstellung)

Hierzu wird dargestellt, wie die mathematische Formulierung der Bestimmungsgrößen auf Informationsgrundlage der erweiterten MTM-UAS Analyse zur Bestimmung der Beschreibungsparameter dem ersten und zweiten Schritt des Vorgehensmodells entsprechend erfolgt. Anschließend werden das Vorselektionsverfahren dem dritten Schritt entsprechend sowie die Bestimmungsgrößen zur Bewertung der vorselektierten Komponenten dem vierten Schritt des Vorgehensmodells entsprechend beschrieben. Der fünfte Schritt des Vorgehensmodells wird in Form eines Optimierungsproblems dargestellt. Hierzu erfolgt eine Definition und mathematische Formulierung einer Zielfunktion und ihrer Nebenbedingungen, auf Grund derer die Funktionsfähigkeit des DAS zu ab-

zusichern ist. Dem Optimierungsproblem folgend, werden verschiedene Lösungsverfahren bezugnehmend auf Effektivität und Effizienz zu Lösung des Optimierungsproblems erörtert und das best- bewertete Lösungsverfahren detailliert dargestellt.

8.2.1 Definition der Beschreibungsparameter (Bestimmungsgrößen)

In diesem Abschnitt erfolgt eine Definition und formale Bestimmung der Bestimmungsgrößen, welche im ersten sowie im zweiten Schritt des Vorgehensmodells zur Verfügung zu stellen sind. Bei den Bestimmungsgrößen handelt es sich zum einen um die Bestimmungsgrößen der Ausgangssituation MTMA (MTMA = Ausführungszeit in der Ausgangssituation), HEPA (HEPA = menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit in der Ausgangssituation) und LEARNA (LEARNA = Einlern- und Trainingszeit in der Ausgangssituation) sowie um die Beschreibungsparameter beziehungsweise deren Tendenzkennzahlen Mobilitätsgrad (DM), Kognitive Werkerbelastung (CWL), Flexibilitätsgrad (DF), Informationsquellen (IS), Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP), Zugang zu der Werkerinformation (AWI), reale versus virtuelle Informationsdarstellung (RvsV), Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD), Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (IA) und Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit des Systems (SA).



Abbildung 42: 1. Schritt – Bestimmung der Ausgangssituation (eigene Darstellung)

Im Rahmen der Bestimmung der Ausgangssituation gilt es zunächst, die Ausführungszeit zu ermitteln. Zur Berechnung der Ausführungszeit (Ausführungszeit in der Ausgangssituation) werden alle mittels MTM-UAS Analyse bewerteten Zeiten der einzelnen Tätigkeiten (der menschlichen Bewegungsabläufe) summiert. Die Summe aller Zeiteile der einzelnen Tätigkeiten stellt die ausgehende Ausführungszeit dar und wird als Ausgangszeit MTMA dargestellt. Dabei wird für jeden mit MTM-UAS (MTMUAS) analysierten Tätigkeitsschritt n die spezifische Ausgangszeit für alle betrachteten Produkte ermittelt und zunächst auf Montageplatzebene und anschließend auf Gesamtmontagelinienenebene summiert.

$$MTMA = \sum_{n=1}^{\infty} MTMUAS_n, n = \in N$$

Gleichung 43

Die Berechnung der Einlern- und Trainingszeit LEARNA erfolgt in Übereinstimmung mit der Darstellung in Kapitel 7.2.2. Dabei wird zunächst für jeden mit MTM-UAS analysierten Tätigkeitsschritt n die spezifische Einlern- und Trainingszeit über alle betrachteten Produkte ermittelt und zunächst auf Montageplatzebene und danach auf Gesamtmontagelinienebene summiert.

$$LEARNA = \sum_{n=1}^{\infty} LEARN_n, n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 44}$$

$$HEPA = \sum_{n=1}^{\infty} HEP_n, n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 45}$$

Quantifiziert wird die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit HEPA der Berechnungsdarstellung in Kapitel 7.3.2. entsprechend. Dabei wird für jeden mit MTM-UAS analysierten Tätigkeitsschritt n die spezifische HEP über alle betrachteten Produkte und Produktvarianten ermittelt und zunächst auf Montageplatzebene und anschließend auf Gesamtmontagelinienebene summiert (vgl. Gleichung 45). Zusammenfassend gilt:

$$\text{Ausgangssituation} = MTMA + LEARNA + HEPA \quad \text{Gleichung 46}$$

Nachdem auf diese Weise die Ausgangssituation durch die Bildung der Summe von von MTMA, LEARNA und HEPA quantifiziert worden ist, erfolgt im zweiten Schritt des Vorgehensmodells die mathematische Formulierung der Beschreibungsparameter DAS.



Abbildung 43: 2. Schritt – Quantifizierung der Beschreibungsparameter (eigene Darstellung)

Die einzelnen Berechnungsschritte sind in Tabelle 57 als Zusammenfassung des Kapitels 5.2 dargestellt.

Tabelle 57: Bestimmung der Beschreibungsparameter (eigene Darstellung)

Beschreibungsparameter	Darstellung der Berechnungsschritte	Tendenzkennzahl TK
Mobilitätsgrad (DM), vgl. Kapitel 5.2.1	Die Berechnung erfolgt über die Ermittlung der Anzahl an Arbeitspositionen, Gehbewegungen, Bück-Bewegungen, Aufsteh- und Hinsetzbewegungen sowie über visuelle Kontrollen, mit denen eine Blickfeldverschiebung einhergeht: Anzahl an Arbeitspositionen, ermittelt über den Materialbereitstellungs-ort und den Montageort + Anzahl an Gehbewegungen + Anzahl an Bück-Bewegungen + Anzahl an Aufsteh- und Hinsetzbewegungen + Anzahl an visuelle Kontrollen (Blickfeldverschiebungen)	Likert-Skaliert [0-4]
Kognitive Werkerbe- lastung (CWL), vgl. Kapitel 5.2.2	Die Berechnung erfolgt nach ZELTZER (2012) [116]: $P(LOW) = \frac{e^{18.164-3173PWL-2326PTL-2182ADL-0.344TWL}}{1 + e^{18.164-3173PWL-2326PTL-2182ADL-0.344TWL}}$ PWL = Anzahl Teile im Arbeitssystem PTL = Anzahl Behälter im Arbeitssystem ADL = Anzahl Arbeitspositionen im Arbeitssystem TWL = Anzahl Werkzeuge im Arbeitssystem	Likert-Skaliert [1 - 0]
Felxibilitätsgrad (DF), vgl. Kapitel 5.2.3	Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an ZELTZER (2012) [116]: Anzahl Varianten desselben Modells * Anzahl von Varianten in der Arbeitsstation	Likert-Skaliert [0-4]
Informationsquellen (SI), vgl. Kapitel 5.2.4	Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an ZELTZER (2012) [116]: Anzahl Varianten desselben Modells * Anzahl von Varianten in der Arbeitsstation	Likert-Skaliert [0-4]
Zeitpunkt der Infor- mationsbereitstellung (TIP), vgl. Kapitel 5.2.5	Die Berechnung erfolgt nach ZELTZER (2012) [116]: Dieser Beschreibungsparameter wird gleich der Cognitive Work Load berechnet	Likert-Skaliert [0-15]
Zugang zu der Werkerinformation (AWI), vgl. Kapitel 5.2.6		Likert-Skaliert [0-4]
Real versus virtuelle Informationen (RvV) = Produktkomplexität (PC) vgl. Kapitel 5.2.7	Die Berechnung erfolgt nach SAMY und EIMARAGHY (2010) [123] Produktkomplexität: $CI_{Produkt} = \sum_{i=1}^n x_i C_{Teil}$ Die Gesamtproduktkomplexität ist das Gesamtergebnis der einzelnen Teile-Komplexitäten, aus denen sich ein Gesamtprodukt zusammensetzt. $C_{Teil} = \frac{C_h \sum_{h=1}^J C_{h,f} + C_i \sum_{i=1}^K C_{i,f}}{\sum_{h=1}^J C_{h,f} + \sum_{i=1}^K C_{i,f}}$	Likert-Skaliert [0-15]

Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD), vgl. Kapitel 5.2.8	Die Berechnung erfolgt über eine Analyse zum Vorhandensein folgender MTM-UAS-Elemente: M-PAA, M-PAB, M-PAC; M-PBA, M-PBB; M-PCA, M-PCB; M-PDA, M-PDB; M-PEA, M-PEB, M-PEC; M-PFA, M-PFB; M-PZF, M-PZG; IDTE; IDTW; IDES; IDEM; IAVE; IAVW; IAHA; IAHT; IAHR; IAKK; IAKW; IAKS; IAEU; IAEG; VA;M-MAB	binär [0;1] • 0 = keine Dialogtätigkeit • 1 = Dialogtätigkeit
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeugen (AI), vgl. Kapitel 5.2.9	Die Berechnung erfolgt über eine Analyse zum Vorhandensein folgender MTM-UAS-Elemente: EH*; PZ*; HA*; HB*; HC*; M-ABB; M-ABC; M-ABD; M-ACB; M-ACC; M-ADB; M-ADC; M-AGB; M-AGC; M-AHB; M-AHC;M-RAB, M-RAC, M-RAD; M-RBB; M-RBC; M-RBD; M-RCB; M-RCC; M-RCD; M-BHA; M-BHB; M-BHC; M-BHD; M-BIB; M-BIC; M-BID; M-BKA; M-BRB; M-BRC; M-BRD; M-BNA; M-BNB; M-BNC; M-BND; M-BQA; M-BQB; M-BQC; M-BQD; M-BZI; M-BZH; M-FAA; M-FAC; M-FLA; M-FMA; M-FNA; M-FPA; M-FQA; M-FRA; M-FSA; M-FZA; M-KAC; M-KCC; M-KKC; M-LBB; M-LBE; M-LBL; M-LBN; M-LAC; M-MAA; M-MAB; M-MBA; M-MBB; M-MGZ; M-MPS; M-MSS; M-PAA; M-PAB; M-PAC; M-PBA; M-PBB; M-PCA; M-PCB; M-PDA; M-PDB; M-PEA; M-PEB; M-PEC; M-PFA; M-PFB; M-PZF; M-PZG; M-SHA; M-SJS; M-SKS; M-SLS; M-SMS; M-SNS; M-SOS; M-SPS; M-SGA; M-SHA; M-SGA; M-SZA; BA*; BB*; MTM-MRK	binär [0;1] • 0 = keine Interaktionstätigkeit • 1 = Interaktionstätigkeit
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA), vgl. Kapitel 5.2.10		Likert-Skaliert [0-4]



Abbildung 44: 3. Schritt – Vor-Priorisierung

An Hand der über die Berechnung der Beschreibungsparameter resultierenden Tendenzkennzahlen erfolgt im 3. Schritt des Vorgehensmodells auf Grundlage der in Kapitel 5.3 dargestellten Tabelle 30 bis Tabelle 34 eine Vor-Priorisierung (Vorselektion) relevanter Komponenten DAS. Bezug nehmend auf diese Komponenten erfolgt im 4. Schritt des Vorgehensmodells die Wirtschaftlichkeitsbewertung.

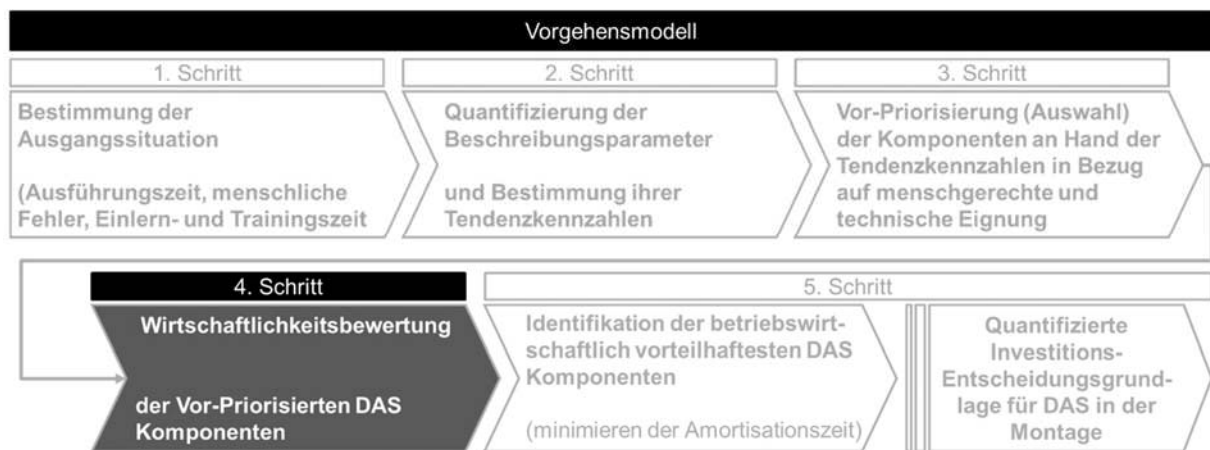


Abbildung 45: 4. Schritt – Wirtschaftlichkeitsbewertung (eigene Darstellung)

Hierzu werden die Einflüsse auf die Ausführungszeit (MTME = Ausführungszeit in Soll-situation), die Einflüsse auf die Einlern- und Trainingszeit (LEARNE = Einlern- und Trainingszeit in Sollsituation) sowie die Einflüsse auf die auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit (HEPE = Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler in Sollsituation) quantifiziert.

Der Einfluss auf die Ausführungszeit (MTME) resultiert aus der Verwendung der Komponenten des D-Pools, TS-Pools sowie des IR-Pools. Bei dem D-Pool wird der ausgehenden Ausführungszeit (MTMA) entsprechend der Aufwand zur Bedienung der unterschiedlichen Devices multipliziert mit der Anzahl der auszuführenden Tätigkeiten, im Folgenden als AT bezeichnet. Die Anzahl der Tätigkeiten (AT) wird auf Basis der MTM-Analyse als das Produkt aus Anzahl (A) und Häufigkeit (H) der Tätigkeitsausführung berechnet. Es gilt:

$$AT_n = A_n * H_n, n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 47}$$

Die Anzahl der Tätigkeiten über alle Schritte (n) einer zusammenhängenden Montagetätigkeit wird wie folgt dargestellt.

$$AT_{gesamt} = \sum_{n=1}^{\infty} AT_n, n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 48}$$

Der Einfluss auf die Ausführungszeit (MTME) wird durch die Komponenten des D-Pools, des TS-Pools sowie durch die Komponenten des IR-Pools determiniert. Während die Einflussnahme durch die Komponenten des D-Pools und des TS-Pools durch manuelle Interaktionen des Werkers erfolgt, ist die Einflussnahme auf die Ausführungszeit durch Komponenten des IR-Pools durch den informationsverarbeitenden Prozess des Werkers begründet.

Die Zeit zur Ausführung der Bedienung der unterschiedlichen Devices (Komponenten des D-Pools) wird auf Basis der folgenden Modellierung angenommen. Die Modellierung folgt der vereinfachten Annahme, dass zur Bedienung des Device stets zwei visuelle Kontrollblicke (MTM-UAS: 2 * VA) und eine Betätigung (MTM-UAS: 1 * BA1) vorzunehmen sind, wenn keine automatisierte Weiterschaltung der Werkerinformation durch die Integration von Komponenten aus dem TS-Pool erfolgt. Erfolgt mit den Komponenten TS₅, TS₆, TS₇, TS₈, TS₉, TS₁₀, TS₁₁ und TS₁₂ des TS-Pools eine automatisierte Weiterschaltung der Werkerinformation, so wird der Bedingung gefolgt, dass in jedem Fall zwei visuelle Kontrollblicke vorzunehmen sind.

Tabelle 58: Interaktionsaufwand ohne und mit automatisierter Weiterschaltung (eigene Darstellung)

Komponenten des D-Pools	MTM-UAS (ohne TS ₅ , TS ₆ , TS ₇ , TS ₈ , TS ₉ , TS ₁₀ , TS ₁₁ , TS ₁₂)	TMU	Sekunden	MTM-UAS (mit TS ₅ , TS ₆ , TS ₇ , TS ₈ , TS ₉ , TS ₁₀ , TS ₁₁ , TS ₁₂)	TMU	Sekunden
D ₁	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₂	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₃	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₄	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₅	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₆	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₇	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₈	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08
D ₉	2 * VC + 1 * BA1	40	1,44	2 * VC	30	1,08

Durch Verwendung der Komponenten TS₁, TS₂, TS₃ oder auch TS₄ wird die Ausführungszeit (MTME) durch den zusätzlichen Aufwand einer manuellen Bedienung dieser Sensoriken erhöht (vgl. Tabelle 59). Die Ist-Ausführungszeit (MTMA) wird dabei ergänzt um den manuellen Aufwand zur Bedienung der Sensoriken und multipliziert mit der Anzahl der auszuführenden Tätigkeit (AT). Zur Bestimmung der Anzahl der Tätigkeiten gilt Gleichung 51. Die zur Bedienung dieser Komponenten notwendige durchschnittliche Zeit ist den in der folgenden Tabelle angeführten Bedienungszeiten zu entnehmen.

Tabelle 59: Zeitaufwand im Falle einer manuellen Bedienung von Komponenten des TS-Pools (eigene Darstellung)

Komponenten des TS-Pools	Beschreibung der Ausführung zur Bedienung	MTM-UAS	TMU	Sekunden
TS ₁	Sprechen von durchschnittlich 3 Wörtern	-	84	3,00
TS ₂	Durchschnittlich 2 Blicke und Drücken eines Buttons	2 * VA + BA1	40	1,44
TS ₃	Durchschnittlich 2 Blicke, Scanner aufnehmen und scannen	2 * VA + HB1 + BA1	80	2,88
TS ₄	Durchschnittlich 2 Blicke, Scanner aufnehmen und scannen	2 * VA + HB1 + BA1	80	2,88

Während die Komponenten D₄, D₅, D₇ und D₈ eine ausgeprägte mobile Einsatzfähigkeit aufweisen, sind die Komponenten D₁, D₂, D₃, D₆ und D₉ an einer fixen Stelle montiert. Um die auf diesen Devices angezeigten Informationen aufnehmen zu können, ist der Werker je nach Standort des Devices und seiner Montageposition gezwungen, sich zwischen Standort des Devices und der Montageposition hin und her zu bewegen. Demzufolge ist für die Informationsaufnahme über die Komponenten D₁, D₂, D₃, D₆ und D₉ ein zusätzlicher Aufwand zu kalkulieren. Hierzu wird die aus der MTM-UAS Analyse identifizierte Anzahl der Geh-Bewegungen (AGB) zwischen der Montageposition und der Materialbereitstellungsposition zur Kalkulation des Mehraufwandes herangezogen. Der Mehraufwand wird als Multiplikation aus AGB und KA = 25 TMU berechnet.

Bei Verwendung einer Komponente des IR-Pool erhöht sich die Ausführungszeit (MTMA) dem Aufwand der Informationsaufnahme entsprechend, multipliziert mit der Anzahl der auszuführenden Tätigkeiten (AT). Die hierfür kalkulierte Zeit wird auf Grundlage von Tabelle 60 angenommen. Die Anzahl der Tätigkeiten wird auf Basis der MTM-Analyse als Produkt aus Anzahl (A) und Häufigkeit (H) der Tätigkeitsausführung berechnet, vgl. Gleichung 47.

Tabelle 60: Durchschnittlicher Zeitaufwand zur Informationsaufnahme und –verarbeitung
(eigene Darstellung)

Komponenten des IR-Pools	Beschreibung der Informationsaufnahme	MTM-UAS	TMU	Sekunden
IR ₁	Durchschnittlich: 2 Blicke, Lesen 2 Wörter und 2 Einzelmerkmale vergleichen:	2 * VA + 2 * IAVE	60	2,16
IR ₂	Durchschnittlich: 2 Blicke, Lesen 2 Wörter und 2 Einzelmerkmale vergleichen:	2 * VA + 2 * IALE + 2 * IAVE	120	4,32
IR ₃	Durchschnittlich: 2 Blicke, Aufnahme von 2 Einzelmerkmalen und 2 Einzelmerkmale vergleichen	2 * VA + 2 * IALE + 2 * IAVE	120	4,32
IR ₄	Durchschnittlich: 2 Blicke, Aufnahme von 2 Einzelmerkmalen und 2 Einzelmerkmale vergleichen:	2 * VA + 2 * IALE + 2 * IAVE	120	4,32
IR ₅	Durchschnittlich: Hören von 3 Wörtern und 2 Einzelmerkmale vergleichen:	2 Wörter hören + 2 * IAVE	115	4,14
IR ₆	Durchschnittlich: 2 Blicke, Aufnahme von 2 Einzelmerkmalen und 2 Einzelmerkmale vergleichen:	2 * VA + 2 * IALE + 2 * IAVE	120	4,32
IR ₇	erfolgt automatisiert	-	-	-

Zur Berechnung der Einflussnahme auf die Ausführungszeit ist demnach darauf zu achten, ob die Komponenten TS₅, TS₆, TS₇, TS₈, TS₉, TS₁₀, TS₁₁, TS₁₂ oder die Komponenten TS₁, TS₂, TS₃, TS₄ des TS-Pools in Kombination mit den Komponenten D₄, D₅, D₇ oder D₈ des D-Pools oder in Kombination mit den Komponenten D₁, D₂, D₃, D₆ oder D₉ des D-Pools betrachtet werden. Darüber hinaus ist zur Berechnung der Einflussnahme auf die Ausführungszeit die gewählte IR-Komponente des IR-Pools zu beachten. Die jeweiligen Einflüsse der Komponenten auf die Ausführungszeit ist zusammenfassend in Tabelle 100, Tabelle 101 und in Tabelle 102 im Anhang dargestellt. Zur Berechnung des Einflusses auf die Ausführungszeit *MTME* gilt:

For $D_b \{0,1\}, TS_c \{0,1\}, IR_d \{0,1\}, d \{1, \dots, 9\}, c \{1, \dots, 11\}, d \{1, \dots, 7\}$

if $D_1 \vee D_2 \vee D_3 \vee D_6 \vee D_9 = 1$

$$MTME_i = MTMA + AT_n * XMTM_n(D_b) + AT_n * XMTM_n(TS_c) + AT_n * XMTM(IR_d) + AT_n * AGB_n * 25TMU, n \in \mathbb{N}, i \{1, \dots, 11\}$$

Gleichung 49

else

$$MTME_i = MTMA + AT_n * XMTM_n(D_b) + AT_n * XMTM_n(TS_c) + AT_n * XMTM(IR_d), n \in \mathbb{N}, i \{1, \dots, 11\}$$

Endfor

Der Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit (LEARNE) erfolgt der im Anhang dargestellten Tabelle 102: entsprechend, wobei $XLEARN_n$ den quantifizierten Einfluss

auf die Einlern- und Trainingszeit des Werkers durch die einzelne Informationsrepräsentationsform (IR) auf jeden Tätigkeitsschritt n darstellt:

$$LEARNE_i = LEARNA - (LEARNA * XLEARN_n(IR_d)), n \in \mathbb{N}, d = \{1, \dots, 7\} \quad \text{Gleichung 50}$$

Der Einfluss auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit (HEPE) erfolgt in Übereinstimmung mit den im Anhang angeführten Tabelle 99 und Tabelle 101, wo bei $XHEP_n$, $n \in \mathbb{N}$ den quantifizierten Einfluss auf die HEP durch die einzelnen Komponenten bezugnehmend auf jeden Tätigkeitsschritt n darstellt, hier die Komponenten des TS-Pools. Es sind Tätigkeiten mit Verwendung eines Hilfs-, Betriebsmittels oder Werkzeuges (Tätigkeiten mit Ausführung einer Komponente aus dem T-Pool) von Tätigkeiten ohne Verwendung eines Hilfs-, Betriebsmittels oder Werkzeuges (Tätigkeiten ohne Ausführung einer Komponente aus dem T-Pool) zu unterscheiden.

$$HEPE_i = HEPA - (HEPA * XHEP_n(TS_c)) - (HEPA * XHEP_n(T_a)), n \in \mathbb{N}, a \{1, \dots, 7\}, c \{1, \dots, 11\} \quad \text{Gleichung 51}$$

Der Einfluss auf das Investitionsvolumen (INVEST) resultiert aus der Verwendung der Komponenten aller Pools. Das Investitionsvolumen setzt sich dabei zusammen aus Investitionen in Soft- und Hardwarekomponenten (ISH) sowie aus dem Aufwand zur Inbetriebnahme, das heißt der Installation und Konfiguration (IK) des DAS. ISH wird dabei durch fixe Investitionen in Softwaresysteme (SfE) sowie durch fixe Investitionen in Hardwaresysteme (HfE) und variable Hardware-Investitionen (HvE) determiniert. Die variablen Hardwaresystem-Investitionen stehen dabei in Abhängigkeit zu Multiplikatoren auf Basis der Komponenten. Auch der Aufwand bzw. die Investitionen zur Inbetriebnahme, Installation und Konfiguration (IK) des DAS basieren auf fixen sowie auf variablen Investitionen. Während sich die fixen Investitionen auf die grundlegende Installation des DAS beziehen, stehen die variablen Investitionen in Abhängigkeit von diversen Multiplikatoren basierend auf der Arbeitsplatzorganisation sowie auf der Heterogenität der am DAS beteiligten IT-Systeme. Die Kalkulation der Investitionen wird auf Basis der folgenden Modellierung angenommen. Investitionen wurden auf der Grundlage von Angebotsrecherchen berechnet, welche im Rahmen des Projektes TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 (FFG: Nr. 852105 und Nr. 852103) erhoben worden sind. Die einzelnen Werte sind Tabelle 99, Tabelle 100, Tabelle 101, Tabelle 102, Tabelle 103 und Tabelle 104 im Anhang zu entnehmen. Die folgende Tabelle fasst ergänzende Anmerkungen zusammen.

Tabelle 61: Anmerkungen zu Investitionen in Soft- und Hardware (ISH) (eigene Darstellung)

Investitionen in Soft- und Hardware (ISH)
T-Pool: Investitionen in Softwaresysteme werden nicht kalkuliert, da es sich hier meist um eine in der Hardware-Komponente integrierte Software handelt. Die Komponente T_{11} basiert auf einem Softwaresystem, welches integriert in den restlichen Komponenten ist.
IR-Pool: Investitionen in Softwaresysteme sind in den Investitionserfordernissen innerhalb der Komponenten des IP-Pools enthalten. Hardwaresysteme sind an dieser Stelle nicht explizit erforderlich.
II-Pool: Es wird der Annahme gefolgt, dass die Software- und Hardwaresysteme im Industrieunternehmen vorhanden sind. Der Aufwand zur Implementierung (Schnittstellen) sind in den IK-Investitionen abgebildet.
IP-Pool: Die Klassifikation des IP-Pools erstreckt sich entlang des TRLs. In Bezug auf die Softwaresysteme ist ein entsprechend kalkulierter Entwicklungsaufwand angenommen. Hardwaresysteme sind an dieser Stelle nicht explizit erforderlich.

Die Bestimmung des Investitionsvolumens zur Inbetriebnahme, Installation und Konfiguration (IK) des DAS ist wie folgt beschrieben: IK setzt sich aus einem fixen Stundenanfang (FAS) addiert mit dem Produkt eines variablen Stundenanteils (VAS) und dem Multiplikator für den variablen Anteil in Stunden (MvAS) zusammen. Der resultierende Stundenanfang ist mit einem Personalstundensatz (PK) zu multiplizieren. Auf Grundlage von Tabelle 99 im Anhang erfolgt die Beschreibung der Komponenten des T-Pools.

$$INVEST_T = SfE(T_a) + HfE(T_a) + (MHv(T_a) * HvE(T_a)) + FAS(T_a) + (MvAS(T_a) * VAS(T_a)), \quad T \in \mathbb{N}, a = \{1, \dots, 7\} \quad \text{Gleichung 52}$$

Den im Anhang in Tabelle 100 dargestellten Angaben entsprechend erfolgt folgende Beschreibung der Komponenten des TS-Pools.

$$INVEST_D = SfE(D_b) + HfE(D_b) + (MHv(D_b) * HvE(D_b)) + FAS(D_b) + (MvAS(D_b) * VAS(D_b)), \quad D \in \mathbb{N}, b = \{1, \dots, 9\} \quad \text{Gleichung 53}$$

Den im Anhang in Tabelle 101 dargestellten Angaben entsprechend erfolgt folgende Beschreibung der Komponenten des TS-Pools.

$$INVEST_{TS} = SfE(TS_c) + HfE(TS_c) + (MHv(TS_c) * HvE(TS_c)) + FAS(TS_c) + (MvAS(TS_c) * VAS(TS_c)), \quad TS \in \mathbb{N}, c = \{1, \dots, 9\} \quad \text{Gleichung 54}$$

Den im Anhang in Tabelle 102 dargestellten Angaben entsprechend erfolgt folgende Beschreibung der Komponenten des IR-Pools.

$$INVEST_{IR} = SfE(IR_d) + HfE(IR_d) + (MHv(IR_d) * HvE(IR_d)) + FAS(IR_d) + (MvAS(IR_d) * VAS(IR_d)), \quad IR \in \mathbb{N}, d = \{1, \dots, 8\} \quad \text{Gleichung 55}$$

Den im Anhang in Tabelle 103 dargestellten Angaben entsprechend erfolgt folgende Beschreibung der Komponenten des II-Pools.

$$INVEST_{II} = SfE(II_e) + HfE(II_e) + (MHv(II_e) * HvE(II_e)) + FAS(II_e) + (MvAS(II_e) * VAS(II_e)), II \in \mathbb{N}, e = \{1, \dots, 3\}$$

Gleichung 56

Den in Tabelle 104 im Anhang dargestellten Angaben entsprechend erfolgt folgende Beschreibung der Komponenten des IP-Pools.

$$INVEST_{IP} = SfE(IP_f) + HfE(IP_f) + (MHv(IP_f) * HvE(IP_f)) + FAS(IP_f) + (MvAS(IP_f) * VAS(IP_f)), IP \in \mathbb{N}, f = \{1, \dots, 3\}$$

Gleichung 57

Die Gesamtinvestitionen setzen sich aus der Summe der Einzelkomponenten zusammen. Es gilt:

$$INVEST_i = INVEST_T + INVEST_D + INVEST_{TS} + INVEST_{IR} + INVEST_{II} + INVEST_{IP}, i, T, D, TS, IR, II, IP \in \mathbb{N}$$

Gleichung 58

Der 5. Schritt des Vorgehensmodells, die Identifikation der betriebswirtschaftlich vorteilhaftesten DAS Komponenten wird in den folgenden Kapiteln 8.2.2 und 8.2.3 dargestellt.

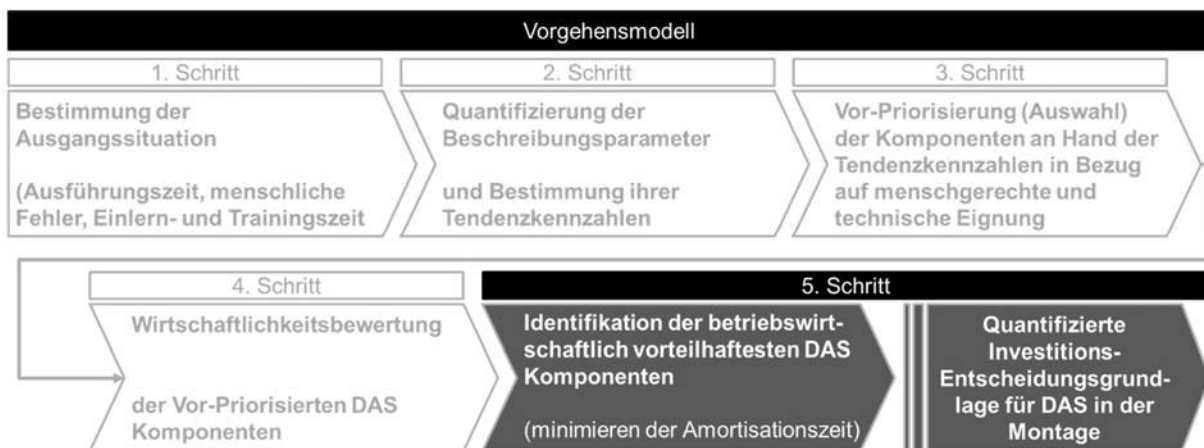


Abbildung 46: 5. Schritt - Identifikation der betriebswirtschaftlich vorteilhaftesten DAS Komponenten (eigene Darstellung)

8.2.2 Formulierung des Optimierungsproblems

In Summe wird eine Auswahl von insgesamt 41 ($n = 41$) Komponenten, entsprechend der Morphologie DAS aufgezeigt. Aus dem T-Pool sind 0 bis 12 Komponenten auswählbar, je nachdem, ob das betrachtete zu integrierende Tool eine für die Ausführung der Arbeitsaufgabe spezifische Relevanz besitzt. In Bezug auf eine Funktionsfähigkeit

des DAS kann aus dem D-Pool, dem TS-Pool, dem IR-Pool sowie dem II-Pool jeweils eine Komponente ausgewählt werden.

Tabelle 62: Anzahl möglicher Komponenten (eigene Darstellung)

T-Pool	Anzahl zur Wahl stehender Komponenten für das DAS Design kann 0 bis 12 betragen
D-Pool	Anzahl zur Wahl stehender Komponenten für das DAS Design kann 1 betragen
TS-Pool	Anzahl zur Wahl stehender Komponenten für das DAS Design kann 1 betragen
IR-Pool	Anzahl zur Wahl stehender Komponenten für das DAS Design kann 1 betragen
II-Pool	Anzahl zur Wahl stehender Komponenten für das DAS Design kann 1 betragen

Es können demnach zwischen 4 ($k=4$) und 16 ($k=16$) Komponenten ausgewählt werden. Die Anzahl von Kombinationen reicht demnach von 135.751 Kombinationsmöglichkeiten bis zu 1.015.828.093.665 Kombinationsmöglichkeiten, entsprechend folgender mathematischer Beschreibung:

$$\frac{(n + k - 1)!}{(n - 1)! k!}$$

Gleichung 59

Auf Grund der Vielzahl Komponenten DAS sowie auf Grund der Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten basiert die Selektion und Auswahl der Komponenten auf einem zweistufigen Optimierungsansatz. In einem ersten Schritt erfolgt eine Vorselektion der Komponenten unter Beachtung der Beschreibungsparameter DAS mit Bezug auf den individuellen Werker. Diesem Vorselektionsprozess folgt die Selektion der technischen Komponenten auf Grundlage betriebswirtschaftlicher Aspekte.

Auf Basis der bestimmten Beschreibungsparameter und deren Tendenzkennzahlen wird anschließend mit den zugeordneten Tendenzkennzahlen der einzelnen Komponenten DAS in Bezug auf das T-Pool, D-Pool, TS-Pool, IR-Pool und II-Pool eine Vorselektion durchgeführt. Bezugnehmend auf die Vorselektion der einzelnen Komponenten gilt, dass die Differenz zwischen dem Beschreibungsparameter und dessen ermittelter Tendenzkennzahl und den definierten Tendenzkennzahlen der Komponenten möglichst minimal ist. In Tabelle 108 im Anhang wird eine Darstellung der technischen Komponenten bezugnehmend auf deren Codierung und dem definierten Selektionsregelwerk (Referenzintervall des Beschreibungsparameters auf die DAS Komponente und deren Bedingungen) gegeben. Anschließend werden die Komponenten selektiert, bei welchen die Differenz zwischen den definierten Tendenzkennzahlen und der in der Analyse auszuführenden Tätigkeiten berechneten Tendenzkennzahlen (TK) ermittelt wird. Es erfolgt dabei eine binäre Codierung, das heißt, die Komponenten, bei denen die Differenz zwischen der definierten Tendenzkennzahl und den aus der Analyse auszuführenden Tätigkeiten berechneten Beschreibungsparameter und deren Tendenzkennzahlen möglichst minimal im Vergleich zu allen anderen Komponenten aus dem

jeweiligen Technologie-Poolist, wird mit 1 codiert. Die übrigen Komponenten werden mit 0 codiert. Hierdurch werden technisch relevante sowie aus Sicht des Werkers humangerechte Komponenten DAS von nicht relevanten Komponenten getrennt. Nur diese selektierten Komponenten werden im anschließend dargestellten Optimierungsproblem aus betriebswirtschaftlicher Sicht betrachtet.

Eine quantifizierte Identifikation der entsprechenden Komponenten DAS erfolgt schlussendlich auf Basis folgender Zielfunktion, einer Return-on-Investment Funktion folgend [181]:

$$\min: \frac{INVEST_i}{MTME_i + LEARNE_i + HEPE_i}, i \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 60}$$

Es gelten folgende Nebenbedingungen (NB):

- **NB 1:** Wenn TS_7 oder TS_8 oder TS_{10} gewählt wird, dann ist IP_1 zu wählen
- **NB 2:** Wenn TS_9 oder II_2 oder II_3 gewählt werden, dann ist IP_2 zu wählen
- **NB 3:** Wenn weder IP_1 oder IP_2 gewählt wird, ist IP_3 zu wählen

Darüber hinaus sind folgende Nebenbedingungen einzuhalten:

- **NB 5:** Die Summe ausgewählter Komponenten aus dem D-Poll muss 1 sein.
- **NB 6:** Die Summe ausgewählter Komponenten aus dem TS-Poll muss 1 sein.
- **NB 7:** Die Summe ausgewählter Komponenten aus dem IR-Poll muss 1 sein.
- **NB 8:** Ist die Summe ausgewählter Komponenten aus dem T-Poll größer als 1, dann ist IR_7 auszuwählen.

Die Zielfunktion samt den Nebenbedingungen verdeutlicht, dass die Funktion auf einer vereinfachten Amortisationsrechnung basiert und dass es gilt, die Amortisationszeit zu minimieren. Dieses Verfahren beruht auf einer statischen, vereinfachten Investitionsrechnung und dient der Ermittlung der Kapitalbindungsdauer einer Investition [180]. Die Amortisationszeit wird in diesem Fall errechnet, indem die Summe der benötigten monetären Investitionen für die ausgewählten Komponenten durch deren jährlich zu erwartenden monetären Rückflüsse dividiert wird. Die Rückflüsse ergeben sich in Bezug auf die monetär bewerteten Ergebnisse für MTME, LEARNE und HEPE. Folgerichtig verdeutlicht die Zielfunktion eine Optimierung im Sinne eines Suchens nach den besten Komponenten für ein DAS, wodurch ein mit der Zielfunktion einhergehendes, multikriterielles Optimierungsproblem dargelegt ist [182]. Das aufgezeigte Optimierungsproblem verdeutlicht eine wirtschaftliche Entscheidungsfindung.

8.2.3 Formulierung des Lösungsverfahrens

In der wissenschaftlichen Literatur sind vielfältige Verfahren, mit denen Optimierungsprobleme lösbar sind, angeführt wie bei ZIMMERMANN (2008) [183]. Dabei werden unter anderem Algorithmen und Heuristiken eingesetzt. Ein Algorithmus wird als eine definierte und eindeutige Handlungsvorschrift zur Lösung eines Problems oder einer Klasse von Problemen definiert und besteht aus endlich vielen, wohldefinierten Einzelschritten [184]. Heuristiken sind ein analytisches Vorgehen, bei dem mit begrenztem Wissen über ein System mit Hilfe mutmaßender Schlussfolgerungen Aussagen über das System getroffen werden. Die daraus gefolgerten Aussagen weichen von der optimalen Lösung ab. Durch Vergleich mit einer optimalen Lösung kann die Güte der Heuristik bestimmt werden [185]. GÜNTHER (2010) unterscheidet dabei zwischen klassischen (konventionellen) Algorithmen und evolutionären Algorithmen [182]. Klassische Algorithmen teilt GÜNTHER (2010) erstens nach der Art der zugrundeliegenden Problemstellung (bekannter vs. unbekannter Funktionsverlauf), zweitens nach dem Umgang mit umweltbezogenen Einflussgrößen (analytische vs. statistische Verfahren) und drittens nach der Genauigkeit der Lösungsfindung (exakte vs. heuristische Verfahren) ein [182]. Dabei zeichnet sich die Mehrheit klassischer Algorithmen zur Lösung schwieriger Probleme dadurch aus, dass sie eine einmal gefundene (Näherungs-) Lösung nach bestimmten Vorgehensregeln verbessert. In Bezug auf die Lösung eines Optimierungsproblems sind an dieser Stelle stellvertretend folgende Optimierungsverfahren zu nennen [183], [186]:

- Simulated Annealing nach SCOLLEN und HARGRAVES (2018) [187].
- Tabu Search nach WANG und CHEN (2013) [188].
- Branch and Bound nach WEINBERG (1973) [189].
- Threshold Accepting nach DUECK und SCHEUER (1990) [186].

Demgegenüber entwickeln evolutionäre Algorithmen (EA) [190] in einer Population zusammengefasste Menge von Lösungen systematisch weiter in Richtung Optimum, indem die systematische Übernahme von Erkenntnissen aus der Biologie auf ökonomische Sachverhalte angewendet wird [182]. Als Optimierungsverfahren ist hier der genetische Algorithmus (GA) zu nennen [191]. Evolutionäre Algorithmen (EA) sind eine Klasse von stochastischen, metaheuristischen Optimierungsverfahren, deren Funktionsweise sich an der Evolution natürlicher Lebewesen orientiert. In Anlehnung an die Natur werden Lösungskandidaten für ein bestimmtes Problem künstlich evolviert, EA stellen demnach naturanaloge Optimierungsverfahren dar. Die Zuordnung zu stochastischen und metaheuristischen Algorithmen bedeutet, dass EA vielfach nicht die beste

Lösung für ein Problem finden, aber im Falle des Erfolgs hinreichend gut sind. Das ist, in der Praxis vor allem bei NP-vollständigen Problemen bereits wünschenswert. Die Verfahren verschiedener EA unterscheiden sich in erster Linie durch die genutzten Selektions-, Rekombinations- und Mutationsoperatoren, durch das Genotyp-Phänotyp-Mapping und die Problemrepräsentation [191].

Es gibt vier Hauptströmungen, deren Konzepte zumindest historisch voneinander zu unterscheiden sind, deren Abgrenzung jedoch in den vergangenen Jahren zunehmend verschwimmt [191]: Genetische Algorithmen (GA), evolutionäre Algorithmen (EA), genetische Programmierung und evolutionäre Programmierung. Das Verfahren evolutionärer beziehungsweise genetischer Algorithmen besteht aus einer Initialisierung und einer Schleife, die solange durchlaufen wird, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist [190].

- Initialisierung: Die erste Generation von Lösungskandidaten wird (zufällig) erzeugt.
- Evaluation: Jedem Lösungskandidaten der Generation wird entsprechend seiner Güte ein Wert der Fitnessfunktion zugewiesen.

Durchlaufen die folgenden Schritte, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist [190]:

- Selektion: Auswahl von Individuen für die Rekombination
- Rekombination: Kombination der ausgewählten Individuen
- Mutation: Zufällige Veränderung der Nachfahren
- Evaluation: Jedem Lösungskandidaten der Generation wird entsprechend seiner Güte ein Wert der Fitnessfunktion zugewiesen.
- Selektion: Bestimmung einer neuen Generation

Die verschiedenen EA bzw. GA weichen in der Auswahl der Operatoren voneinander ab. Sie unterscheiden sich außerdem durch verschiedene Problemrepräsentationen, durch entsprechende Fitnessfunktionen oder durch zusätzliche Schritte. Eine Rekombination muss dabei nicht zwangsläufig stattfinden, da die Individuen sich auch asexuell fortpflanzen können [190]. Dabei folgt ein EA dem folgenden Schema [192]:

```

t = 0;
initialize(P(t));
evaluate(P(t));
while isNotTerminated() do
    Pp(t) = selectParentsFrom(P(t));
    Pc(t) = reproduction(Pp(t));
    mutate(Pc(t));
    evaluate(Pc(t));
    P(t+1) = buildNextGenerationFrom(Pc(t), P(t));
    t = t + 1; end

```

Die Grundgesamtheit $P_{(t=0)}$ der GA beziehungsweise EA wird zufällig initialisiert, um eine breite Stichprobe des Suchraums zu erhalten. Die Ausgangspopulation wird ausgewertet, bevor der Erzeugungszyklus der GA beziehungsweise EA eingegeben wird. Die GA beziehungsweise EA wählt zunächst mögliche Eltern P_p aus der aktuellen Population $P_{(t)}$ auf der Basis ihrer erreichten Fitness aus. Die Eltern P_p werden verwendet, um eine Population P_c zu erzeugen, entweder durch das Erzeugen einfacher Klone oder durch Rekombination mehrerer Eltern. Die Rekombination verfolgt dabei das Ziel, die Eigenschaften der in den Eltern vertretenen Lösungen auszutauschen, um neue Kombinationen dieser Eigenschaften bei den Nachkommen zu erzeugen. Dabei besteht jedoch die Möglichkeit, dass die zufällige Rekombination perfekte Klone der Eltern hervorbringt. Die Nachkommenschaft P_c wird dann einer zufälligen Mutation unterzogen, wodurch die Eigenschaften der in den Individuen gespeicherten Lösungen erneut verändert werden. Anschließend werden die Nachkommen bewertet, um ihre Fitness zu bestimmen. Schließlich wird die nächste Generation aus der aktuellen Population $P_{(t)}$ und dem Nachwuchs $P_{c(t)}$ generiert, wobei eine eigene Erzeugungsstrategie verwendet wird, die vom vollständigen Ersatz ($P_{(t+1)} = P_{c(t)}$) mit oder ohne Elitismus bis hin zu den allmählichen Veränderungen im Falle der stationären GA beziehungsweise EA reicht. Schließlich gibt es ein Abbruchkriterium, das zu erfüllen ist, bevor die GA beziehungsweise EA den iterativen Optimierungsprozess unterbricht [192].

Zur Vorbereitung der Auswahl eines geeigneten Lösungsverfahrens für das definierte Optimierungsproblem werden die zentralen Merkmale des zugrundeliegenden Optimierungsproblems dargestellt [192].

- Das Optimierungsproblem gehört der Klasse kombinatorischer Optimierungsprobleme an, da aus einer großen Menge von diskreten Elementen eine Teilmenge zu konstruieren ist, welche Nebenbedingungen erfüllt und bezüglich einer vereinfachten Amortisationsfunktion optimal ist. Die Suche ist auf einen endlichen und diskreten Lösungsraum beschränkt.
- Das Problem ist einer hohen Anzahl von Restriktionen unterworfen, welche determiniert ist durch die technische Funktionsfähigkeit eines DAS
- Die Anzahl abhängiger Entscheidungsvariablen erhöht die Suchraum-Komplexität.

Zur Lösung sind im Allgemeinen mehrere Verfahren in Betracht zu ziehen. Unterschiedliche Verfahren wurden auf ihre Eignung hin untersucht. Auf Grund der Lösungsproblemähnlichkeit erfolgt die Argumentation in Anlehnung an BEUMELBURG (2005). Tabelle 108 im Anhang fasst die Bewertung der unterschiedlichen Optimierungsverfahren zusammen [193]. Von den betrachteten Verfahren erfüllen die evolutionären

beziehungswise die genetischen Algorithmen die Anforderungen des Optimierungsproblems auf Grund der guten Ausprägung der Problemverträglichkeit, der Effizienz und Robustheit sowie der flexiblen Gestaltung am besten.

Die Formulierung des evolutionären beziehungsweise des genetischen Algorithmus erfolgt entlang der folgenden acht Schritte (Subroutinen) [191]:

- Schritt 1: Das zu optimierende Problem wird codiert, d. h. es wird auf einem binärodierten Chromosom abgebildet.
- Schritt 2: Eine Population von Individuen wird erzeugt und zufällig initialisiert. Man spricht hier von der Ausgangspopulation beziehungsweise Generation 0.
- Schritt 3: Jedes Individuum wird mit einer Fitnessfunktion bewertet, welche jedem einzelnen Chromosom eine reell wertige Zahl zuordnet.
- Schritt 4: Zwei Elternteile werden jeweils mittels einer Selektionsvariante selektiert.
- Schritt 5: Aus den genetischen Informationen der Eltern werden mittels einer gewählten Kreuzungsvariante die Nachkommen erzeugt.
- Schritt 6: Alle Nachkommen sind in der Lage zu mutieren.
- Schritt 7: Die Population wird um die neu erzeugten Nachkommen ergänzt. Wird die Populationsgröße überschritten, wird nach einem gewählten Ersetzungsschema eine Menge von Individuen bestimmt, die durch die neuen ersetzt wird.
- Schritt 8: Ab Schritt 4 werden die Subroutinen so lange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

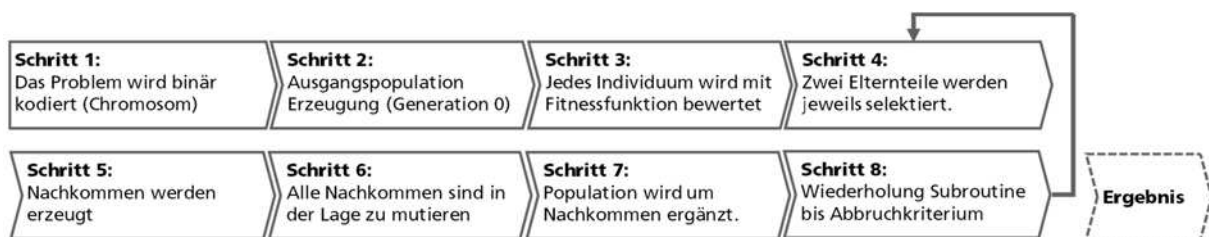


Abbildung 47: Formulierung des evolutionären beziehungsweise des genetischen Algorithmus (eigene Darstellung)

In Übereinstimmung mit Schritt 1 der oben dargestellten Subroutine der Modellierung genetischer Algorithmen wird zunächst das Problem binär codiert. Hierzu werden die folgenden Komponenten DAS binär codiert.

Insgesamt sind auf diese Weise sechs Chromosomen den Technologie-Pools entsprechend erzeugt worden, deren Genanzahl der Anzahl der in den jeweiligen Technologie-Pools aufgeführten Anzahl Komponenten entspricht. Es gilt:

$$T_a, D_b, TS_c, IR_d, II_e, IS_f \in \{0,1\}$$

Tabelle 63: Binäre Codierung der Komponenten DAS (eigene Darstellung)

T-Pool	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
$T_a \in \{0,1\}$	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}
D-Pool	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	D ₉	-	-	-
$D_b \in \{0,1\}$	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	-	-	-
TS-Pool	TS ₁	TS ₂	TS ₃	TS ₄	TS ₅	TS ₆	TS ₇	TS ₈	TS ₉	TS ₁₀	-	-
$TS_c \in \{0,1\}$	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	-	-
IR-Pool	IR ₁	IR ₂	IR ₃	IR ₄	IR ₅	IR ₆	IR ₇	-	-	-	-	-
$IR_d \in \{0,1\}$	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	{0,1}	-	-	-	-	-
II-Pool	II ₁	II ₂	II ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$II_e \in \{0,1\}$	{0,1}	{0,1}	{0,1}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IP-Pool	IP ₁	IP ₂	IP ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$IP_f \in \{0,1\}$	{0,1}	{0,1}	{0,1}	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Im 2. Schritt wird eine Ausgangspopulation von Individuen erzeugt. In dem hier vorliegenden Optimierungsproblem erfolgt die Erzeugung jedoch nicht zufällig. Es werden die Komponenten mit 1 codiert, bei welchen die Differenz zwischen den angeführten Tendenzkennzahlen, welche den Komponenten zugeordnet sind, und der aus der Analyse der auszuführenden Tätigkeiten berechnete Beschreibungsparameter möglichst minimal ist.

Hierzu gilt folgende Formulierung für die Komponenten des T-Pools:

$$AD = \{x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, 12\}$$

$$AI = \{x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, 12\}$$

$$T = \{d_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, 12\}$$

For $j = 1$ to 12

if $x_j = 1$

$d_j = 1$

else $d_j = 0$

Endfor

Gleichung 61

Es gilt folgende Formulierung für die Komponenten des D-Pools:

$$DM_i = \{y_{1i} \leq x_i \leq y_{2j}, \quad x_j \in \mathbb{R}, \quad j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 9\}$$

$$D = \{d_j \mid j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 9\}$$

For $j = 1$ to 9

$$\text{if} \quad y_{1j} \leq TK(DM) \leq y_{2j}$$

$$d_j = 1$$

$$\text{else} \quad d_j = 0$$

Endfor

Gleichung 62

Es gilt folgende Formulierung für die Komponenten des TS-Pools:

$$TIP_i = \{y_{1i} \leq x_i \leq y_{2j}, \quad x_j \in \mathbb{R}, \quad j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 10\}$$

$$TS = \{d_j \mid j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 10\}$$

For $j = 1$ to 10

$$\text{if} \quad y_{1j} \leq TK(TIP) \leq y_{2j}$$

$$d_j = 1$$

$$\text{else} \quad d_j = 0$$

Endfor

Gleichung 63

Es gilt folgende Formulierung für die Komponenten des IR-Pools:

$$RvV_i = \{y_{1i} \leq x_i \leq y_{2j}, \quad x_j \in \mathbb{R}, \quad j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 7\}$$

$$IR = \{d_j \mid j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 7\}$$

For $j = 1$ to 10

$$\text{if} \quad y_{1j} \leq TK(RvV) \leq y_{2j}$$

$$d_j = 1$$

$$\text{else} \quad d_j = 0$$

Endfor

Gleichung 64

Es gilt folgende Formulierung für die Komponenten des II-Pools:

$$DF = SI$$

$$SI_i = \{y_{1i} \leq x_i \leq y_{2j}, \quad x_j \in \mathbb{R}, \quad j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 3\}$$

$$SI = \{d_j \mid j \in \mathbb{N}, \quad j = 1, \dots, 3\}$$

For $j = 1$ to 3

$$\text{if } y_{1j} \leq TK(SI) \leq y_{2j}$$

$$d_j = 1$$

$$\text{else } d_j = 0$$

Endfor

Gleichung 65

Darüber hinaus sind die oben angeführten Nebenbedingungen entsprechend einer Gewährleistung der technischen Funktionalität DAS entsprechend abzubilden. Im Hinblick auf NB 1, NB 2 und NB 3 gilt:

$$\text{For } TS_i = \{TS_7, TS_8, TS_{10}\}$$

$$\text{if } TS_7 \vee TS_8 \vee TS_{10} = 1$$

$$IP_1 = 1$$

$$\text{elseif } TS_8 \vee II_2 \vee II_3 = 1$$

$$IP_2 = 1$$

$$\text{elseif } IP_1 \vee IP_2 \vee II_3 = 0$$

$$IP_3 = 1$$

Endfor

Gleichung 66

Darüber hinaus sind folgende Nebenbedingungen einzuhalten:

- **NB 5:** Die Summe der Anzahl ausgewählter Komponenten aus dem D-Poll muss 1 sein.

$$\sum_{b=1}^9 D_b = 1, \quad b = \{1, \dots, 9\}$$

Gleichung 67

- **NB 6:** Die Summe der Anzahl ausgewählter Komponenten aus dem TS-Poll muss 1 sein.

$$\sum_{c=1}^{10} TS_c = 1, \quad c = \{1, \dots, 11\}$$

Gleichung 68

- **NB 7:** Die Summe der Anzahl ausgewählter Komponenten aus dem IR-Poll muss 1 sein.

$$\sum_{d=1}^7 IR_d = 1, \quad d = \{1, \dots, 7\} \quad \text{Gleichung 69}$$

- **NB 8:** Wenn die Summe der Anzahl ausgewählter Komponenten aus dem T-Poll größer ist, dann ist IR_7 auszuwählen.

```

For i = 1 to 12
    if       $\sum_{a=1}^{12} T_a > 0, a \in \mathbb{N}$ 
         $IR_7 = 1$ 
    else    $IR_7 = 0$ 
Endfor

```

Gleichung 70

Für jede in der Ausgangspopulation mit 1 codierten Komponente (Ausgangs-Chromosom) erfolgt den in Schritt 1 und Schritt 2 aufgestellten Regeln entsprechend, in Schritt 3 mittels einer Fitnessfunktion eine ganzheitliche Bewertung der gesamtbetriebswirtschaftlichen Effizienz eines DAS. Die Zielfunktion des aufgestellten Optimierungsproblems wird hierbei als Fitnessfunktion¹⁶ verwendet (vgl. Gleichung 60):

Im 4. Schritt werden durch Selektion aus der vorliegenden Population die Elternindividuen der nächsten Generation bestimmt. Die Selektion erfolgt hierbei zufallsgesteuert (stochastische Selektion) dem Prinzip der natürlichen Auslese folgend. Die erzielten Fitnesswerte liegen normalisiert vor. Hier in Form einer Amortisationszeit.

Im 5. Schritt werden aus den genetischen Informationen der Eltern mittels einer gewählten Kreuzungsvariante die Nachkommen erzeugt. Dadurch erfolgt eine Rekombination, welche neue Informationen in die Population einbringt. Dadurch werden neue Individuen aus den selektierten Eltern erzeugt. Über die Rekombination werden Informationen (Gene) zwischen zwei potenziellen Lösungen ausgetauscht. Dabei werden Bruchstücke (Cross-Over) zwischen den Chromosomen ausgetauscht. In der Literatur werden unterschiedliche Arten von Crossover-Operatoren dargestellt [195]. Im vorliegenden Fall wird dem 1-Point-Crossover Zufallsprinzip gefolgt.

¹⁶ Zielfunktion eines evolutionären Algorithmus (EA) beziehungsweise Zielfunktion eines genetischen Algorithmus [194]

Im 6. Schritt erfolgt eine Mutation der jeweiligen Chromosomen-Gene. Die Mutation stellt einen sekundären Operator dar und dient zum Einbringen von neuem bzw. verlorengegangenen Genmaterial (Genwerten) in die Population. Auch bei der Mutation gibt es verschiedene Varianten [195]. Im vorliegenden Fall erfolgt die Mutation nach dem Prinzip der Flipmutation zufallsgesteuert. Bei dem vorliegenden Binärstring wird unter Einhaltung der Nebenbedingungen der Binärwert des Gens invertiert.

Im 7. Schritt wird die Population auf Basis der Schritte 4 – 5 um die neu erzeugten Nachkommen ergänzt.

Schritt 4 – 7 werden so lange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Vor diesem Hintergrund wird im 8. Schritt eine entsprechende Abbruchbedingung definiert. Abbruchbedingungen legen fest, wann eine numerische Optimierung gestoppt werden soll. Häufig wird das Überschreiten einer maximalen Iterationszahl, die Verifikation einer gefundenen Lösung oder die Stagnation des Suchprozesses als Terminierungskriterium eingesetzt. Die einfachste Variante ist das Erreichen einer vorgegebenen Anzahl von Generationen (absolute Terminierung). Eine andere Variante ist die Berücksichtigung der Konvergenz (relative Terminierung). Dabei terminiert der genetische Algorithmus, sobald in einer vorgegebenen Anzahl von Generationsschritten keine Verbesserung erzielt wurde. Im vorliegenden Fall erfolgt ein Abbruch auf Basis einer relativen Terminierung. Der Algorithmus stoppt, wenn nach 30 Generationsschritten keine Verbesserung erzielt wurde [195]. Dieses Abbruchkriterium hat sich in durchgeführten Versuchsreihen als gut geeignet herausgestellt.

8.3 Kritische Reflexion und Zusammenfassung

Das Kapitel verdeutlicht die Möglichkeit eines Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS als Grundlage einer menschenorientierten und betriebswirtschaftlichen Investitionsentscheidung. Das Vorgehensmodell beschreibt, wie DAS Beschreibungsparameter, ihre Einflussfaktoren sowie ihre Wirkzusammenhänge mit auszuführenden Montagetätigkeiten auf Grundlage einer erweiterten MTM-UAS Analyse unter Berücksichtigung individueller Werker-Profile in der Montage quantifiziert bestimmbar sind. Die einzelnen Schritte des Vorgehensmodells sind in Abbildung 48 zusammenfassend dargestellt.

1. Schritt	Bestimmung der Ausgangssituation: <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Ausführungszeit: MTMA • Berechnung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit: HEPA • Berechnung der Einlern- und Trainingszeit: LERNA
2. Schritt	Quantifizierung der Beschreibungsparameter und Bestimmung derer Tendenzkennzahlen: <ul style="list-style-type: none"> • Mobilitätsgrad (DM) • Kognitive Werkerbelastung (CWL) • Flexibilitätsgrad (DF) • Informationsquellen (IS) • Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP) • Zugang zu der Werkerinformation (AWI) • Reale versus virtuelle Informationsdarstellung (RvsV) • Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD) • Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI) • Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit des Systems (SA)
3. Schritt	Vor-Priorisierung der technischen Komponenten an Hand der Tendenzkennzahlen in Bezug auf technische Eignung und mitarbeitergerechter Verwendung: <ul style="list-style-type: none"> • T-Pool: PRESELECT_{T-Pool} (T_i (AD, AI)) • D-Pool: PRESELECT_{D-Pool} (D_j (DM, AWI, SA)) • TS-Pool: PRESELECT_{TS-Pool} (TS_s (TIP)) • IR-Pool: PRESELECT_{IR-Pool} (IR_r (CWL, SA)) • II-Pool: PRESELECT_{II-Pool} (II_l (DF, IS))
4. Schritt	Bewertung der Vor-Priorisierten Komponenten: <ul style="list-style-type: none"> • Einfluss auf die Ausführungszeit: MTME • Einfluss auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit: HEPE • Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit: LEARNE • Einfluss auf das Investitionsvolumen: INVEST
5. Schritt	Auswahl der Komponenten in Bezug auf ein mitarbeiter- und produktivitätsgerechtes digitales Assistenzsystem, der Zielfunktion folgend, die Amortisationszeit minimierend: <ul style="list-style-type: none"> • T-Pool: SELECT_{T-Pool} (T_i) (MTME (PRESELECT_{T-Pool} (T_i)), HEPE (PRESELECT_{T-Pool} (T_i)), INVEST (PRESELECT_{T-Pool} (T_i))) • D-Pool: SELECT_{D-Pool} (D_j) (MTME (PRESELECT_{D-Pool} (D_j)), INVEST (PRESELECT_{D-Pool} (D_j))) • TS-Pool: SELECT_{TS-Pool} (TS_s) (MTME (PRESELECT_{TS-Pool} (TS_s)), HEPE (PRESELECT_{TS-Pool} (TS_s)), INVEST (PRESELECT_{TS-Pool} (TS_s))) • IR-Pool: SELECT_{IR-Pool} (IR_r) (MTME (PRESELECT_{IR-Pool} (IR_r)), LEARNE (PRESELECT_{IR-Pool} (IR_r)), INVEST (PRESELECT_{IR-Pool} (IR_r))) • II-Pool: SELECT_{II-Pool} (II_l) (INVEST (PRESELECT_{II-Pool} (II_l))) • IP-Pool: SELECT_{IP-Pool} (II_l) (SELECT_{T-Pool} (T_i), SELECT_{D-Pool} (D_j), SELECT_{TS-Pool} (TS_s), SELECT_{IR-Pool} (IR_r), SELECT_{II-Pool} (II_l)) unter Beachtung technischer Rahmenbedingungen zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des DAS

Abbildung 48: Darstellung der Vorgehenschritte der entwickelten Vorgehensweise
(eigene Darstellung)

Auf Grundlage des entwickelten Vorgehensmodells wird es möglich, unterschiedliche Szenarien des DAS und seiner resultierenden menschenorientierten und betriebswirtschaftlichen Einflüsse auf Arbeitssysteme der Montage zu vergleichen. Das Vorgehensmodell ermöglicht es dabei, Fragen von Industrieunternehmen in Bezug auf Kosteneffekte und Kostenaufwände durch eine transparente Darstellung der Ergebnisse zu verbessern. Die ausgeprägten Verknüpfungen der Beschreibungsparameter mit den einzelnen DAS Komponenten erschweren eine intuitive Anwendung des Vorgehensmodells. Die komplexen Rechenschritte können zwar grundsätzlich mit Papier und Bleistift ausgeführt werden, der manuelle Aufwand ist jedoch bei der Lösungsfindung des DAS mittels genetischen Algorithmus als hoch anzusehen. Die Validierung des Vorgehensmodells erfolgt von diesem Hintergrund anhand eines Proof-of-Concept Demonstrators (PoC-Demonstrator).

Abbildung 49 verdeutlicht, in welche Phasen der Montageplanung Ergebnisse des entwickelten Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS einwirken, beziehungsweise aus welchen Phasen der Montageplanung notwendige Informationen zur Ausführung des Vorgehensmodells erhoben werden. Das Vorgehensmodell ermöglicht eine Anwendung in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses und ist in den Planungsprozess von Montagesystemen integrierbar. Es wird gewährleistet, dass Informationen, welche in der Vorbereitungsphase der Montageplanung anfallen, direkt für die Planung und Evaluierung DAS nutzbar sind. Das entwickelte Vorgehensmodell unterstützt die Phasen der Detailplanung eines Montagesystems, in dem eine fundierte und quantifizierte Investitionsentscheidung zu DAS bereitgestellt wird. Die erzeugten Informationen über den Einfluss DAS auf (a) die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit und den daraus resultierenden Einfluss auf die Montageprozessstabilität, (b) auf die Einlern- und Trainingszeit und schließlich (c) auf die Montageausführungszeit liefern iterativ vertiefende Erkenntnisse der operativen Arbeitsvorbereitung bezugnehmend auf eine effiziente Auslegung und Austaktung einer ganzen Montagelinie

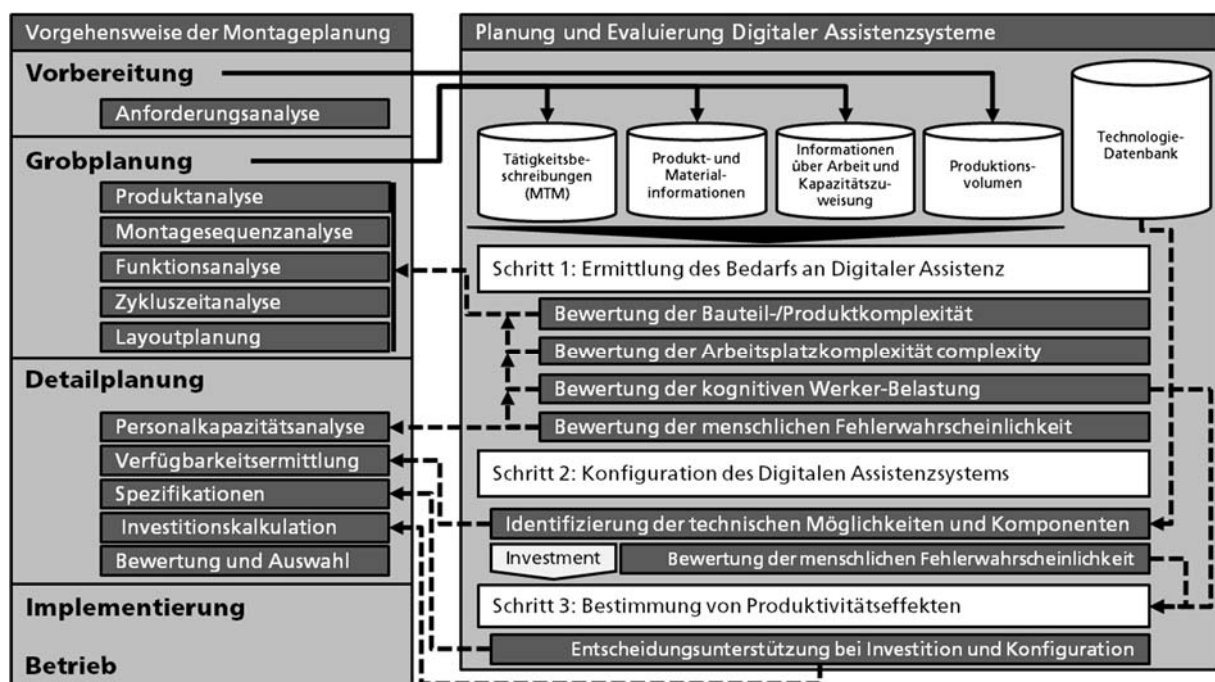


Abbildung 49: Integrationsmöglichkeiten des Vorgehensmodells in Phasen der Montageplanung [57]

9 Validierung durch Anwendung in Use Cases

In diesem Kapitel wird das Vorgehensmodell validiert [196], [197]. Die Validierung erfolgt dabei entlang zweier Use Cases durch Anwendung des Vorgehensmodells auf Basis eines entwickelten Excel-basierten PoC-Demonstrators. Der Aufbau sowie die entsprechende Validierungsergebnisse des entwickelten PoC-Demonstrators sind im Anhang (vgl. Abbildung 65, Tabelle 111) einsehbar. Der erste Use Case ist auf das Montagesystem der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0, einer praxisorientierten Laborumgebung, bezogen [45]. Hier wird ein hoch komplexes Produkt mit der Variantenanzahl 1 montiert. Der zweite Use Case ist auf eine Pilotmontage in einem Industrieunternehmen bezogen. Hier wird ein Produkt von mittlerer Komplexität und einer sehr hohen Variantenanzahl montiert. Es erfolgt eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Arbeitssysteme, der zu montierenden Produkte und Produktvarianten, der dafür notwendigen Montagetätigkeiten (erweiterte MTM-UAS Analysen), deren Zuordnung zu unterschiedlichen Arbeitsstationen und eine Darstellung der Produktionsprogramme. Die Anwendung des Vorgehensmodells erfolgt mittels PoC-Demonstrator entlang beider Use Cases. Die Ergebnisse beider Use Cases werden anschließend analysiert. Abschließend wird das Vorgehensmodell einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, indem unterschiedliche Werkerprofile mit dem Vorgehensmodell zu gleichen Montagetätigkeiten und -systemen verglichen und auf Ergebnisplausibilität überprüft werden. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt abschließend eine zusammenfassende kritische Reflexion.

9.1 Anwendung in einem praxisorientierten Labor Use Case

Die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 wird im Folgenden mit dem dort implementierten cyber-physischen Montagesystem als praxisorientierter, aber unter Laborbedingungen agierender Use Case für die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS verwendet. Basierend auf dem Konzept eines cyber-physischen Montagesystems [4], [5] wurde im Projekt TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 (FFG: Nr. 852105 und Nr. 852103) ein entsprechendes Montagesystem entwickelt. Das Montagesystem basiert dabei auf drei mobilen Montagestationen, an denen ein 3D-Drucker montiert wird. Auto-ID-Technologien wie passive und aktive RFID (Radio Frequency Identification Systems) ermöglichen eine dezentrale Koordination zwischen dem angrenzenden Logistikbereich und dem Materialtransport. In diesem komplexen Montagesystem wird der Werker zum einen durch kollaborative Robotersysteme und zum anderen durch DAS unterstützt. Die Funktionen der Assistenzsysteme sind dabei an die auftragsspezifischen Anforderungen und individuellen menschlichen Bedürfnisse anpassbar [45].

9.1.1 Beschreibung des Labor Use Cases

Gegenwärtig wird eine 3D-Druckervariante im Montagesystem der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 montiert. Somit bezieht sich der zu betrachtende Use Case ausschließlich auf die Montage eines einzelnen Produktes. In Montagestation 1 erfolgt die Montage des Grundrahmens. Hierzu werden vier Rahmen zur Bodenmontage aus dem Material-Kit aufgenommen und auf die Montagevorrichtung, welche auf dem Transportsystem befestigt ist, ausgerichtet. Nachdem die Grundrahmen ausgerichtet worden sind, erfolgt der Aufbau der seitlichen Profilelemente. Diese werden nacheinander dem Material-Kit entnommen, positioniert und anschließend mit jeweils zwei Schrauben, welche bevorratet aus einem Regalsystem an der Montagestation zu entnehmen sind, mit dem Grundrahmen verbunden. Für die Verschraubung wird ein Maschinenschrauber verwendet. Sind Grundrahmen und seitliche Profilelemente miteinander verbunden, erfolgt die Montage von drei Linearmotoren. Nacheinander greift der Werker dafür in die entsprechenden Klein-Ladungsträger (KLT) im Regalsystem, entnimmt als Baugruppe beziehungsweise als Modul vorgefertigt die entsprechenden Linearmotoren und montiert diese an den vertikalen Profilelementen. Die notwendigen Schrauben sind im Regalsystem bevorratet. Für die Verschraubung wird ein Maschinenschrauber verwendet. Abschließend werden vier Stellfüße montiert. Dafür greift der Werker nacheinander in den entsprechenden KLT im Regalsystem, entnimmt einen Stellfuß, richtet die Vorrichtung entsprechend aus und montiert den Stellfuß. Sind diese Tätigkeitsschritte beendet, so fährt das Transportsystem zur Montagestation 2.

Auf Montagestation 2 werden drei Umlenkrollen montiert. Diese sind aus dem Regalsystem an Montagestation 2 zu entnehmen und mit den entsprechenden Schrauben zu montieren. Nachdem die Umlenkrollen erfolgreich montiert worden sind, werden die oberen seitlichen Rahmenprofile auf der rechten und linken Seite montiert. Die entsprechenden Profile sind aus dem Material-Kit zu entnehmen und mittels im Regalsystem bereitgestellter Schrauben unter Einsatz eines Maschinenschraubers festzuschrauben. Im nächsten Schritt wird der sogenannte Extruder-Schlitten aus dem Material-Kit aufgenommen und im oberen Profilrahmen positioniert. Nachdem die Positionierung des Extruder-Schlittens abgeschlossen ist, werden nacheinander die fehlenden oberen Rahmenprofile aus dem Material-Kit entnommen und mittels im Regalsystem bereitgestellter Schrauben unter Verwendung eines Maschinenschraubers festgeschraubt. Nach Beendigung dieser Tätigkeiten fährt das Transportsystem zu dritten Montagestation weiter.

Nachdem Werker und Transportsystem an Montagestation 3 angekommen sind, wird der Drucktisch im Rahmen positioniert. Dieser wird in dem auf Montagestation 3 bereitgestellten Regalsystem durch den Werker entnommen. Im Anschluss werden die Riemen, welche den Extruder-Schlitten in x-, y- und z-Richtung führen, nacheinander montiert. Die Riemen sind ebenso in dem Regalsystem bevorratet. Sind diese Tätigkeitsschritte abgeschlossen, wird die Elektronik eingebaut und die entsprechende Verkabelung vorgenommen. Auch für diese Tätigkeiten sind sämtliche Materialien in dem Regalsystem bevorratet. Die an Montagestation 3 auszuführenden Tätigkeiten sind durchgehend detailreich und unterliegen einer Vielzahl an Detailschritten und erfordern entsprechendes Fachwissen.

Als letzter Schritt wird die Filament-Rolle eingebaut, welche ebenfalls im Regalsystem bevorratet ist. Nach Abschluss dieser Tätigkeiten fährt das fahrerlose Transportsystem weiter zur Qualitätsprüfung. Die dort auszuführenden Tätigkeitsschritte werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Abbildung 66 im Anhang zeigt einen Auszug der erweiterten MTM-UAS Analyse für diesen 3D-Drucker. Es wird davon ausgegangen, dass in den kommenden fünf Jahren ein jährlicher Produktionsbedarf von circa 9.000 3D-Druckern besteht.

9.1.2 Anwendung des Vorgehensmodells

Nachdem die erweiterte MTM-UAS Analyse dem PoC-Demonstrator übergeben worden ist, werden die entsprechenden durchschnittlichen Produktionsmengen eingetragen, in diesem Fall 9.000 Stück pro Jahr. Ferner werden die Personalstundenkostensätze für einen Werker, in diesem Fall 40,00 Euro pro Stunde und 60,00 Euro pro Stunde für einen IT-Mitarbeiter eingegeben. Anschließend werden die Performance Shape Factors, wie im Anhang in Tabelle 112 dargestellt, und die anzugebenden Einflussfaktoren auf Einlern- und Trainingszeit eingegeben, vgl. Tabelle 64.

Tabelle 64: Ergänzende Eingaben zur Quantifizierung der Einlern- und Trainingszeit
(eigene Darstellung)

Geschlecht	[w 2; m 1]	1
Alter	in Jahren	30
Fleishman-Faktoren	FF ₁	50
	FF ₆	50
Akzeptanzniveau	ξ	1,05

Auf Basis der eingegebenen Daten sind folgende Ergebnisse mit dem PoC-Demonstrator ermittelt worden. Hierbei wurden die einzelnen Montagearbeitsplätze, in dem vor-

liegenden Use Case drei Montagearbeitsplätze, separat analysiert, sowie anschließend die aus den drei Montagearbeitsplätzen bestehende Gesamtmontagelinie. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

Montagearbeitsplatz 1: Für die am Montagearbeitsplatz 1 durchzuführenden Tätigkeiten sind auf Basis der Anwendung des Vorgehensmodells folgende Tendenzkennzahlen zu den technischen Beschreibungsparametern DAS identifiziert worden.

Tabelle 65: Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen, Labor Use Case MAP1
(eigene Darstellung)

Labor Use Case MAP1		
Beschreibungsparameter	Skala	ermittelte Tendenzkennzahl
Mobilitätsgrad (DM)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	2,00
Kognitive Werkerbelastung (CLW)	(sehr gering) 0 – 0 (sehr hoch)	0,05
Flexibilitätsgrad (DF)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsquelle (SI)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsbereitstellungszeit (TIP)	(sehr gering) 1 – 0 (sehr hoch)	0,05
Zugang zur Werkerinformation	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	1,00
Reale versus virtuelle Informationen (RvV)	(sehr gering) 0 – 15 (sehr hoch)	4,08
Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD)	binär	0
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI)	binär	1
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00 – 4,00

Die entsprechend den Tendenzkennzahlen vorselektierten DAS Komponenten sind im Anhang in Abbildung 67 dargestellt. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten betrachtet, sind die final identifizierten DAS Komponenten im Anhang in Abbildung 68 dargestellt.

Tabelle 66: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, Labor Use Cases MAP 1
(eigene Darstellung)

Labor Use Cases MAP 1	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	19.217	17.706
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	939.217	939.217
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	261.287	23.659
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.	2.657,10	
Investitionsbedarf in EUR	30.056,00	
Amortisationszeit in Jahren	11,3	

Für die identifizierten DAS Komponenten wurde eine Reduktion der Einlern- und Trainingszeit von 19.217 Sekunden auf 17.706 Sekunden errechnet. Die nach der Einlern- und Trainingszeit benötigte Zeit zur Montage der übrigen Produkte ist gleichgeblieben – resultierend aus der Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool. Am stärksten ist die HEP und ihr Zeitaufwand reduziert wurden. Von ursprünglich 261.287 Sekunden

wurde eine Reduktion auf 23.669 Sekunden errechnet. Insgesamt wird durch die Verwendung der identifizierten DAS Komponenten eine jährliche Einsparung von 2.657,10 Euro erzielt. Demgegenüber steht ein prognostiziertes Investitionsvolumen von 30.056,00 Euro. Daraus ergibt sich eine Amortisationszeit von 11,3 Jahren.

Montagestation 2: Für die auf Montagearbeitsplatz 2 durchzuführenden Tätigkeiten sind auf Basis des durchgeführten Vorgehensmodells folgende Tendenzkennzahlen zu den technischen Beschreibungsparametern DAS identifiziert worden.

Tabelle 67: Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen, Labor Use Case MAP 2
(eigene Darstellung)

Labor Use Case MAP 2		
Beschreibungsparameter	Skala	ermittelte Tendenzkennzahl
Mobilitätsgrad (DM)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	4,00
Kognitive Werkerbelastung (CLW)	(sehr gering) 0 – 0 (sehr hoch)	0,01
Flexibilitätsgrad (DF)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsquelle (SI)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsbereitstellungszeit (TIP)	(sehr gering) 1– 0 (sehr hoch)	0,01
Zugang zur Werkerinformation	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	1,00
Reale versus virtuelle Informationen (RVV)	(sehr gering) 0 – 15 (sehr hoch)	5,78
Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD)	binär	0
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI)	binär	1
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00 – 4,00

Die entsprechend den Tendenzkennzahlen vorselektierten DAS Komponenten sind im Anhang in Abbildung 69 dargestellt. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten betrachtet, sind die final identifizierten DAS Komponenten im Anhang in Abbildung 70 dargestellt. Die Einlern- und Trainingszeit wurde durch die identifizierten Komponenten von 17.121 Sekunden auf 15.775 Sekunden reduziert. Die nach der Einlern- und Trainingszeit benötigte Zeit für Montage der übrigen Produkte bleibt gleich – resultierend aus der Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool. Am stärksten ist die HEP und ihr Zeitaufwand reduziert wurden. Von ursprünglich 208.454 Sekunden wurde eine Reduktion auf 18.958 Sekunden errechnet. Insgesamt wird durch Einsatz der identifizierten DAS Komponenten eine jährliche Einsparung von 2.120,46 Euro erzielt. Demgegenüber steht ein Investitionsvolumen von 23.184,00 Euro. Daraus ergibt sich eine Amortisationszeit von 10,9 Jahren.

Tabelle 68: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, Labor Use Cases MAP 2
(eigene Darstellung)

Labor Use Cases MAP 2	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	17.121	15.775
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	797.778	797.778
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	208.454	18.958
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.	2.120,46	
Investitionsbedarf in EUR	23.184,00	
Amortisationszeit in Jahren	10,9	

Montagestation 3: Für die am Montagearbeitsplatz 3 durchzuführenden Tätigkeiten sind auf Basis des durchgeführten Vorgehensmodells folgende Tendenzkennzahlen zu den technischen Beschreibungsparametern DAS identifiziert worden.

Tabelle 69: Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen, Labor Use Case MAP 3
(eigene Darstellung)

Labor Use Case MAP 3		
Beschreibungsparameter	Skala	ermittelte Tendenzkennzahl
Mobilitätsgrad (DM)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	4,00
Kognitive Werkerbelastung (CLW)	(sehr gering) 0 – 0 (sehr hoch)	0,00
Flexibilitätsgrad (DF)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsquelle (SI)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsbereitstellungszeit (TIP)	(sehr gering) 1– 0 (sehr hoch)	0,00
Zugang zur Werkerinformation	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	1,00
Reale versus virtuelle Informationen (RvV)	(sehr gering) 0 – 15 (sehr hoch)	8,44
Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD)	binär	0
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI)	binär	1
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00 – 4,00

Die den Tendenzkennzahlen entsprechend vorselektierten DAS Komponenten sind im Anhang in Abbildung 71 dargestellt. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten betrachtet, sind final die im Anhang in Abbildung 72 dargestellten DAS Komponenten identifiziert worden. Auf Basis der identifizierten DAS Komponenten wurde eine Reduktion der Einlern- und Trainingszeit von 40.870 Sekunden auf 35.986 Sekunden errechnet. Die nach der Einlern- und Trainingszeit benötigte Montagezeit der übrigen Produkte ist gleichgeblieben – resultierend aus der Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool. Am stärksten ist die HEP und ihr Zeitaufwand reduziert wurden. Von ursprünglich 724.356 Sekunden wurde eine Reduktion auf 71.625 Sekunden errechnet. Insgesamt wird durch die Verwendung der identifizierten DAS Komponenten eine jährliche Einsparung von 7.306,84 Euro erzielt. Demgegenüber steht ein Investitionsvolumen von 24.957,00 Euro. Das ergibt eine, Amortisationszeit von 3,4 Jahren. Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 70: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, Labor Use Cases MAP 3
(eigene Darstellung)

Labor Use Cases MAP 3	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	40.870	35.986
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	2.747.727	2.747.727
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	724.356	71.625
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.	7.306,84	
Investitionsbedarf in EUR	24.957,00	
Amortisationszeit in Jahren	3,4	

Gesamtmontagelinie (Montagestation 1-3): Für die entlang der Gesamtmontagelinie durchzuführenden Tätigkeiten sind auf Basis des durchgeführten Vorgehensmodells folgende Tendenzkennzahlen zu den Beschreibungsparametern DAS identifiziert worden.

Tabelle 71: Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen, Labor Use Case GML
(eigene Darstellung)

Labor Use Case GML		
Beschreibungsparameter	Skala	ermittelte Tendenzkennzahl
Mobilitätsgrad (DM)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	4,00
Kognitive Werkerbelastung (CLW)	(sehr gering) 0 – 0 (sehr hoch)	0,00
Flexibilitätsgrad (DF)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsquelle (SI)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	1,00
Informationsbereitstellungszeit (TIP)	(sehr gering) 1– 0 (sehr hoch)	0,00
Zugang zur Werkerinformation	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	1,00
Reale versus virtuelle Informationen (RvV)	(sehr gering) 0 – 15 (sehr hoch)	8,44
Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD)	binär	0
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI)	binär	1
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00 – 4,00

Die den Tendenzkennzahlen entsprechend vorselektierten DAS Komponenten sind im Anhang in Abbildung 73 dargestellt. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten betrachtet, sind final die im Anhang in Abbildung 74 dargestellten DAS Komponenten identifiziert worden. Auf Basis der identifizierten DAS Komponenten wurde eine Reduktion der Einlern- und Trainingszeit von 154.415 Sekunden auf 150.079 Sekunden errechnet. Die nach der Einlern- und Trainingszeit benötigte Zeit zur Montage der übrigen Produkte ist gleichgeblieben – resultierend aus der Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool. Am stärksten ist die HEP und ihr Zeitaufwand reduziert wurden. Von ursprünglich 1.194.097 Sekunden ist eine Reduktion auf 114.242 Sekunden errechnet worden. Insgesamt wird durch die identifizierten DAS Komponenten eine jährliche Einsparung von 12.046,57 Euro erzielt. Demgegenüber steht ein Investitionsvolumen von

28.414,00 Euro. Das ergibt eine Amortisationszeit von 2,4 Jahren. Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 72: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, Labor Use Case GML
(eigene Darstellung)

Labor Use Case GML	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	154.415	150.079
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	8.969.444	8.969.444
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	1.194.097	114.242
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.		12.046,57
Investitionsbedarf in EUR		28.414,00
Amortisationszeit in Jahren		2,4

9.1.3 Fazit

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die identifizierten Werte und die Auswahl der unterschiedlichen DAS Komponenten korrekt sind und dem entwickelten Vorgehensmodell folgen. Der aufgezeigte Use Case zeigt eine hohe und zum Teil stark ausgeprägte Komplexität der Tätigkeiten. Die Komplexität nimmt dabei über die drei betrachteten Montagestationen zu. Dies verdeutlicht, dass das Vorgehensmodell gut für eine Analyse von komplexen Montagesystemen geeignet ist. Alle Komponenten sind entsprechend ihrer Beschreibung korrekt analysiert und ausgewählt worden. Die einzelnen aus der Montagetätigkeit resultierenden Beschreibungsparameter zur Bestimmung des DAS wurden in korrekter Weise mit den richtigen Komponenten verknüpft. Bezugnehmend auf die analysierte Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen wurden über alle drei betrachteten Montagestationen eine Tätigkeitsausführung mit einem Maschinenschrauber richtig identifiziert. Folgerichtig wurde die Komponente aus dem T-Pool – T₁ – vorselektiert. Dem Merkmal Degree of Mobility folgend sind für die erste Montagestation ausschließlich Devices mit einem geringeren mobilen Einsatzgrad identifiziert und vorselektiert worden. Eine hohe kognitive Belastung der Worker, die aus der Vielzahl der auszuführenden Tätigkeiten und Materialien resultiert, wurde richtig identifiziert. Folgerichtig wurden die Komponenten des TS-Pools vorselektiert. Ergänzend wurde auch der Beschreibungsparameter reale vs. virtuelle Informationsrepräsentation richtig identifiziert. Die den entsprechenden Merkmalsausprägungen zugeordneten Informationsrepräsentationsformen sind entsprechend vorselektiert worden. Abschließend wurden auch die Komponenten aus dem II-Pool richtig bestimmt.

Die final ausgewählten Komponenten stammen alle aus den vorselektierten Komponenten. Das final identifizierte DAS zeigt eine betriebswirtschaftlich vorteilhafte Kombinationsmöglichkeit auf. Die Ausführung des genetischen, evolutionären Algorithmus

erfolgt in einer adäquaten Berechnungszeit. Alle Bedingungen konnten erfüllt werden. Diese Tatsache zeigt, dass die entwickelte Optimierungslösung stabil im Hinblick auf den untersuchten Use Case ausführbar ist. Während für die Montagestation 1 die Komponenten aus dem D-Pool mit einem geringeren Mobilitätsgrad vorselektiert und final bestimmt worden sind, sind entlang der Montagestationen 2 und 3 Komponenten des D-Pools mit einem höheren Mobilitätsgrad identifiziert worden. Die Betrachtung der Gesamtmontagelinie verdeutlicht, dass final eine Komponente des D-Pools mit einem im Vergleich zu Montagestation 1 höheren Mobilitätsgrad gewählt wurde. Die für die Gesamtmontagelinie final selektierte Komponente des D-Pools entspricht einer in den Montagestationen 2 und 3 vorselektierten Komponente.

Auffällig ist, dass die Höhe des Einsparungspotenzials stets mit der Produktkomplexität und mit der Höhe der HEP korreliert. Während der Use Case veranschaulicht, dass in der Reduktion der HEP ein hohes Optimierungspotenzial liegt, zeigt der Use Case ergänzend, dass trotz einer komplexen Montageaufgabe ein relativ geringes Optimierungspotenzial in der Einlern- und Trainingszeit vorhanden ist. Die Berücksichtigung der HEP stellt in dem betrachteten Use Case den zentralen Faktor dar, welcher über die Amortisationszeit des DAS entscheidet. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt ergänzend, dass bei jedem identifizierten DAS eine Komponente aus dem TS-Pool gewählt wird. Hier zeigt sich der betriebswirtschaftliche Mehrwert DAS, in dem durch die Implementierung von Sensorsystemen in der Montageperipherie die HEP reduziert wird.

Ferner legen die Ergebnisse nahe, dass DAS, welche über keine integrierten Sensorsysteme verfügen, einen wesentlich geringeren Beitrag zur Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätssteigerung von Werker und Arbeitssystem leisten. Die Tatsache, dass zu jedem identifizierten DAS Design eine Komponente aus dem TS-Pool identifiziert worden ist, verdeutlicht die Tendenz, dass vor allem der Bedienaufwand in Bezug auf ein manuelles Bestätigen einer erfolgreich beendeten Montagetätigkeit beziehungsweise das manuelle Weiterschalten zu einer nächsten Montagetätigkeit als hoch einzustufen ist. Wird keine TS-Komponente für den betrachteten Use Case identifiziert, wird kein Einsparungspotenzial erzielt. Die folgende Tabelle stellt das betriebswirtschaftliche Ergebnis des gewählten DAS ohne Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool dar. Das Ergebnis zeigt auf, dass die Komponenten des TS-Pools das DAS nicht nur in Bezug auf das zu erzielende Einsparungspotenzial determinieren, sondern auch einen erheblichen Anteil des Investitionsvolumens ausmachen. Auf diese Weise liegt für das identifizierte DAS Design das errechnete Investitionsvolumen ohne eine Komponente des TS-Pools bei 12.494,00 Euro. Verglichen mit dem Investitionsvolumen

mit einer ausgewählten Komponente des TS-Pools ist das Investitionsvolumens um etwa 56% geringer.

Tabelle 73: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, ohne TS-Komponenten
(eigene Darstellung)

GML, ohne Komponenten aus dem TS-Pool		
	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	154.415	150.079
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	8.969.444	16.295.084
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	1.194.097	1.194.097
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.	0,00	
Investitionsbedarf in EUR	12.494,00	
Amortisationszeit in Jahren	keine Amortisation möglich	

9.2 Anwendung in einem Industrie Use Case

Der im Folgenden dargestellte Use Case beschreibt eine Montage entlang zweier Montagearbeitsplätze bei einem Produktionsunternehmen von Sicherheitstechnologien. In den letzten Jahrzehnten sind immer mehr Produktfamilien von Schließsystemen in den Markt eingeführt worden. Auch in den kommenden Jahren werden neue Schließsysteme entwickelt. Mit zunehmender Anzahl an Produktfamilien und Varianten sind die Anforderungen und die Komplexität in der Montage überproportional gestiegen. So werden aus einem Artikelspektrum von über 60.000 Teilen mit 15 Produktfamilien mehrere Milliarden Varianten gefertigt.

9.2.1 Beschreibung des Industrie Use Case

Aufgrund kontinuierlich zunehmender Nachfrageschwankungen und sinkender produktspezifischer Losgrößen werden bei dem Produktionsunternehmen Varianten zunehmend auftragspezifisch produziert. Dies führt zu einer Vermischung von kundenauftragsanonymen und kundenauftragsbezogenen Montageaufträgen. Da das Unternehmen vor diesem Hintergrund einerseits mit den Herausforderungen immer kleiner werdenden Losgrößen und andererseits mit einer zunehmenden Komplexität in den Montageabläufen konfrontiert wird, ist das klassisch angewendete Montageprinzip einer Standplatzmontage in den letzten Jahren zu einer Mixed-Modell-Montage umgestaltet worden. Innerhalb dieses Montagekonzepts werden aktuell aus der Produktfamilie A die Produkte AA und AB entlang zweier Montagearbeitsplätze, dem Prinzip One-Piece-Flow Montage folgend, montiert. Dies wurde möglich, indem die entsprechenden, für den Zusammenbau benötigten Materialien auf zwei Montagestationen verteilt worden sind. In dem Montagesystem wird das Produkt AA auf einem Montagearbeitsplatz (Montagestation 1) und das Produkt AB verteilt auf zwei Montageplätzen (Montagestation 1 und Montagestation 2) montiert. In Summe ist es möglich, von dem

Produkt AA 3.838.380 Variantenausprägungen und von dem Produkt AB 3.838.380 Variantenausprägungen zu montieren. In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Variantenausprägungen der Produkte dargestellt. Die Art der Variantenausprägungen beider Produkte ist gleich, wobei unterschiedliche Materialien eingesetzt werden.

Tabelle 74: Variantenausprägungen der Produkte AA und AB (eigene Darstellung)

Varianten Merkmal	Variantenanzahl
Länge außen, mm	5
Länge innen, mm	5
Oberfläche	12
Sicherheitsmerkmale	6
Einbaumerkmale	10
Nutzungsmerkmale	2

Für den Zusammenbau des Produktes AA wird zunächst ein Gehäusemodul in eine spezifische Vorrichtung eingelegt. Anschließend wird eine Zwischenachse eingesetzt und mit dem Gehäuse mit einem Maschinenschrauber verschraubt. Darauf folgend wird ein Kupplungsadapter in das Gehäuse gesetzt und mit einem Maschinenschrauber verschraubt. Im Anschluss werden Kupplung und eine Sperrnase in dem Gehäuse ebenfalls mit einem Maschinenschrauber verschraubt. Abschließend erfolgt eine einfache Prüfung des zusammengebauten Produkts. Das Produkt ist auf diese Weise fertig montiert und wird auf ein Förderband gelegt, welches es weiter zu einem finalen Prüfprozess transportiert, bevor das Produkt in das Versandlager befördert wird. In Abbildung 75 im Anhang ist ein Auszug der erweiterten MTM-UAS Analyse für das Produkt AA, stellvertretend für eine Variante, als benötigter Dateninput dargestellt.

Der Zusammenbau des Produktes AB beginnt wie bei dem Produkt AA mit dem Einlegen des Gehäusemoduls in eine spezifische Vorrichtung. Die Vorrichtung unterscheidet sich hier jedoch in ihrer Geometrie von jener des Produktes AA. Nachdem das Gehäusemodul in die Vorrichtung eingelegt wurde, ist ein Kupplungsadapter sowie die Kupplung zu montieren. Daran anschließend wird eine Feder zur Justierung der Teile sowie eine Sperrnase montiert. Im Folgenden wird ein sogenanntes Zwischenstück zur exakten Festlegung der verbauungsspezifischen Größe des Produktes montiert. Mit leichten Hammerschlägen wird das Gehäusemodul ausgerichtet und anschließend mit zwei kleinen Schrauben mit einem Maschinenschrauber verschraubt. Während die Tätigkeitsschritte bis zu diesem Punkt an Montagestation 1 ausgeführt worden sind, werden die folgenden Montageschritte an Montagestation 2 ausgeführt. Hierzu wird die Baugruppe aus der Vorrichtung genommen, zu Montagestation 2 gebracht und dort in einer Vorrichtung erneut positioniert. Die entsprechenden Schrauben werden einzeln verschraubt. Nachdem das Gehäuse verschraubt worden ist, wird eine Kunststoff-

abdeckung montiert. Abschließend erfolgt eine einfache Prüfung des zusammengebauten Produkts. Das Produkt ist auf diese Weise fertig montiert und wird auf ein Förderband gelegt, welches es weiter zu einem finalen Prüfprozess transportiert, bevor das Produkt in das Versandlager befördert wird. In der Abbildung 76 im Anhang ist die entsprechende erweiterte MTM-UAS Analyse für das Produkt AB, stellvertretend für eine Variante, als benötigter Dateninput dargestellt. Im Jahr 2017 wurden von den Produkten AA 44.780 Stück und AB 1.831 Stück montiert. Das Unternehmen erwartet in den kommenden fünf Jahren eine Steigerung des Produktionsvolumens beider Produkte von durchschnittlich 8 Prozent jährlich.

Tabelle 75: Forecast der Produktionsmenge 2018 bis 2022 (eigene Darstellung)

Produkt	Referenz-jahr 2017	Forecast – auf Basis des Referenzjahres 2017				
		2018	2019	2020	2021	2022
AA	44.780	48.362	52.230	56.408	60.920	65.793
AB	1.831	1.977	2.135	2.305	2.489	2.668

Aus Tabelle 75 ist zu entnehmen, dass das prognostizierte durchschnittliche Produktionsvolumen den aufgestellten Forecasts entsprechend für das Produkt AA 54.749 Stück pro Jahr und für das Produkt AB 2.234 Stück pro Jahr beträgt. Aufgrund des Montageprinzips einer Mixed-Modell-Montage, immer kleiner werdender Montagelosgrößen und aufgrund einer zunehmenden Fluktuation der Werker in der Montage befürchtet das Unternehmen, dass es zu Prozessinstabilitäten sowie zu einer zunehmenden kognitiven Belastung der Werker kommt. Vor diesem Hintergrund möchte das Unternehmen ein DAS in einer Pilotmontage einführen mit dem Ziel, die kognitive Belastung der Werker zu reduzieren und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit und Produktivität der Montagelinie zu steigern. Im Zuge der Planung und Evaluierung des DAS wird das entwickelte Vorgehensmodell in Form des PoC-Demonstrators angewendet.

9.2.2 Anwendung des Vorgehensmodells

Nachdem die Input-Daten in den PoC-Demonstrator eingegeben worden sind, werden die entsprechenden durchschnittlichen Produktionsmengen eingetragen – für das Produkt AA 45.749 Stück pro Jahr und für das Produkt AB 2.234 Stück pro Jahr. Ferner werden die Personalstundenkostensätze eingegeben und zwar 40,00 Euro pro Stunde für einen Montagearbeiter und 60,00 Euro pro Stunde für einen IT-Mitarbeiter. Im Vergleich zu dem Labor Use Case liegen die gleichen Performance Shape Factor Werte sowie die gleichen einzugebenden Werte in Bezug auf die Einflüsse zur Einlern- und Trainingszeit zu Grunde. Auf Basis der eingegebenen Daten sind folgende Ergebnisse mittels PoC-Demonstrator ermittelt worden. Hierbei wurden die einzelnen Montagearbeitsplätze zunächst separat und anschließend als Gesamtmontagelinie analysiert.

Montagestation 1: Für die auf Montagestation 1 durchzuführenden Tätigkeiten sind auf Basis des durchgeführten Vorgehensmodells folgende Tendenzkennzahlen zu den Beschreibungsparametern DAS identifiziert worden.

Tabelle 76: Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen, Industrie Use Case MAP 1
(eigene Darstellung)

Industrie Use Case MAP 1		
Beschreibungsparameter	Skala	ermittelte Tendenzkennzahl
Mobilitätsgrad (DM)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00
Kognitive Werkerbelastung (CLW)	(sehr gering) 0 – 0 (sehr hoch)	0,01
Flexibilitätsgrad (DF)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	2,00
Informationsquelle (SI)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	7,50
Informationsbereitstellungszeit (TIP)	(sehr gering) 1– 0 (sehr hoch)	0,01
Zugang zur Werkerinformation	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	1,00
Reale versus virtuelle Informationen (RvV)	(sehr gering) 0 – 15 (sehr hoch)	3,97
Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD)	binär	0
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI)	binär	1
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00 – 4,00

Die entsprechend den Tendenzkennzahlen vorselektierten DAS Komponenten sind im Anhang in Abbildung 77 dargestellt. Die entsprechenden Tendenzkennzahlen unter betriebswirtschaftlichen Aspekten betrachtet, sind final die im Anhang in Abbildung 78 dargestellten DAS Komponenten identifiziert worden. Auf Basis der identifizierten DAS Komponenten wurde eine Reduktion der Einlern- und Trainingszeit von 16.172 Sekunden auf 15.517 Sekunden errechnet. Die nach der Einlern- und Trainingszeit benötigte Zeit zur Montage der übrigen Produkte ist gleichgeblieben – resultierend aus der Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool. Am stärksten ist die HEP und deren Zeitaufwand reduziert wurden. Von ursprünglich 469.737 Sekunden ist eine Reduktion auf 3.108 Sekunden errechnet worden. Insgesamt wird durch die identifizierten DAS Komponenten eine jährliche Einsparung von 5.192,00 Euro erzielt. Demgegenüber steht ein Investitionsvolumen von 41.264,00 Euro, das bedeutet eine Amortisationszeit von 7,9 Jahren. Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 77: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, Industrie Use Cases MAP 1
(eigene Darstellung)

Industrie Use Cases MAP 1	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	16.172	15.517
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	1.790.968	1.790.968
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	469.737	3.108
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.	5.192,05	
Investitionsbedarf in EUR	41.264,00	
Amortisationszeit in Jahren	7,9	

Montagestation 2: Für die auf Montagestation 1 durchzuführenden Tätigkeiten sind auf Basis des durchgeführten Vorgehensmodells folgende Tendenzkennzahlen zu den Beschreibungsparametern DAS identifiziert worden.

Tabelle 78: Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen, Industrie Use Case MAP 2
(eigene Darstellung)

Industrie Use Case MAP 2		
Beschreibungsparameter	Skala	ermittelte Tendenzkennzahl
Mobilitätsgrad (DM)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00
Kognitive Werkerbelastung (CLW)	(sehr gering) 0 – 0 (sehr hoch)	1,00
Flexibilitätsgrad (DF)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	2,00
Informationsquelle (SI)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	7,50
Informationsbereitstellungszeit (TIP)	(sehr gering) 1– 0 (sehr hoch)	1,00
Zugang zur Werkerinformation	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	1,00
Reale versus virtuelle Informationen (RvV)	(sehr gering) 0 – 15 (sehr hoch)	4,36
Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD)	binär	0
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI)	binär	0
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00 – 4,00

Die den Tendenzkennzahlen entsprechend vorselektierten DAS Komponenten sind im Anhang in Abbildung 79 dargestellt. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten betrachtet, sind final die im Anhang in Abbildung 80 dargestellten DAS Komponenten identifiziert worden. Auf Basis der identifizierten DAS Komponenten wurde eine Reduktion der Einlern- und Trainingszeit von 9.702 Sekunden auf 9.320 Sekunden errechnet. Die nach der Einlern- und Trainingszeit benötigte Zeit zur Montage der übrigen Produkte ist gleichgeblieben – resultierend aus der Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool. Am stärksten ist die HEP und deren Zeitaufwand reduziert wurden. Von ursprünglich 250.507 Sekunden ist eine Reduktion auf drei Sekunden errechnet worden. Insgesamt wird durch die identifizierten DAS Komponenten eine jährliche Einsparung von 2.787,62 Euro erzielt. Demgegenüber steht ein Investitionsvolumen von 23.740,00 Euro, das entspricht einer Amortisationszeit von 8,5 Jahren. Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 79: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, Industrie Use Cases MAP 2
(eigene Darstellung)

Industrie Use Cases MAP		
	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	9.702	9.320
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	927.281	927.281
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	250.507	3
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.	2.787,62	
Investitionsbedarf in EUR	23.470,00	
Amortisationszeit in Jahren	8,5	

Gesamtmontagelinie (Montagestationen 1-2): Für die auf der Gesamtmontagelinie durchzuführenden Tätigkeiten sind auf Basis des durchgeführten Vorgehensmodells folgende Tendenzkennzahlen zu den Beschreibungsparametern DAS identifiziert worden.

Tabelle 80: Beschreibungsparameter und Tendenzkennzahlen, Industrie Use Case GML
(eigene Darstellung)

Industrie Use Case GML		
Beschreibungsparameter	Skala	ermittelte Tendenzkennzahl
Mobilitätsgrad (DM)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00
Kognitive Werkerbelastung (CLW)	(sehr gering) 0 – 0 (sehr hoch)	0,00
Flexibilitätsgrad (DF)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	2,00
Informationsquelle (SI)	(sehr gering) 0 – ∞ (sehr hoch)	7,50
Informationsbereitstellungszeit (TIP)	(sehr gering) 1– 0 (sehr hoch)	1,00
Zugang zur Werkerinformation	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	1,00
Reale versus virtuelle Informationen (RvV)	(sehr gering) 0 – 15 (sehr hoch)	4,36
Möglichkeit der Dialogführung / Dokumentation (AD)	binär	0
Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen (AI)	binär	1
Benutzer- und Gebrauchsfreundlichkeit (SA)	(sehr gering) 0 – 4 (sehr hoch)	0,00 – 4,00

Die den Tendenzkennzahlen entsprechend vorselektierten DAS Komponenten sind im Anhang in Abbildung 81 dargestellt. Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten betrachtet, sind final die im Anhang in Abbildung 82 dargestellten DAS Komponenten identifiziert worden. Auf Basis der identifizierten DAS Komponenten wurde eine Reduktion der Einlern- und Trainingszeit von 25.773 Sekunden auf 25.004 Sekunden errechnet. Die nach der Einlern- und Trainingszeit benötigte Zeit zur Montage der übrigen Produkte ist gleichgeblieben – resultierend aus der Verwendung einer Komponente aus dem TS-Pool. Am stärksten ist die HEP und deren Zeitaufwand reduziert wurden. Von ursprünglich 720.244 Sekunden ist eine Reduktion auf 3.111 Sekunden errechnet worden. Insgesamt wird durch die identifizierten DAS Komponenten eine jährliche Einsparung von 7.977,81 Euro erzielt. Demgegenüber steht ein Investitionsvolumen von 41.516,00 Euro, was einer Amortisationszeit von 5,2 Jahren entspricht. Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 81: Betriebswirtschaftliche Effekte und Amortisationszeit, Industrie Use Cases GML
(eigene Darstellung)

Industrie Use Case GML	Ausgangssituation (Ist-Zustand)	Zielsituation (Soll-Zustand)
Einlernzeit in Sekunden / p.a.	25.873	25.004
Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Sekunden / p.a.	2.718.249	2.718.249
HEP-Gesamt in Sekunden / p.a.	720.244	3.111
Einsparungspotenzial in EUR / p.a.	7.977,81	
Investitionsbedarf in EUR	41.516,00	
Amortisationszeit in Jahren	5,2	

9.2.3 Fazit

In Ergänzung zu Kapitel 9.1.3 zeigt der Vergleich der Ergebnisse bezogen auf die unterschiedlichen Montagestationen und auf die Gesamtmontagelinie, dass die identifizierten Werte und die Auswahl der unterschiedlichen Komponenten korrekt sind und dem entwickelten Vorgehensmodell folgen. Der aufgezeigte Use Case ist im Vergleich zu dem Labor Use Case durch eine wesentlich geringere Komplexität der Tätigkeitsausführung gekennzeichnet. Jedoch ist durch die Vielzahl der unterschiedlichen Materialien sowie durch die Vielzahl unterschiedlicher Kleinteileladungsträger die kognitive Belastung des Werkers höher.

Wie im vorangegangenen Use Case sind auch in diesem Use Case alle DAS Komponenten entsprechend ihrer definierten Beschreibung richtig analysiert und ausgewählt worden. Die einzelnen aus der Montagetätigkeit resultierenden Beschreibungsparameter sind mit den richtigen Komponenten verknüpft. Die Interaktion mit einem Hilfs-, Betriebsmittel beziehungsweise Werkzeug in Montagestation 1 wurde richtig identifiziert. Folgerichtig wurde die Komponente aus dem T-Pool – T1 – vorselektiert. Dem Merkmal Mobilitätsgrad folgend sind für beide Stationen ausschließlich Devices mit einem sehr geringeren Mobilitätsgrad vorselektiert worden. Dies folgt der Tatsache, dass in beiden Montagestationen keine Anforderungen an einen mobilen Einsatz von Informationsausgabegeräten gegeben ist. Eine hohe kognitive Belastung der Werker – resultierend vor allem aus der Vielzahl der in den einzelnen Montagestationen auszuführenden Tätigkeiten bei vielfältigen Produktvarianten – wurde richtig identifiziert. Alle Komponenten des TS-Pools wurden vorselektiert. Ergänzend wurde auch das Merkmal der realen vs. virtuellen Informationsrepräsentation richtig identifiziert. Die den entsprechenden Ausprägungen zugeordneten Informationsrepräsentationsformen sind richtig vorselektiert worden. Auch die Komponenten des II-Pools sind richtig identifiziert und vorselektiert worden. Die final ausgewählten technischen Komponenten stammen alle aus den vorselektierten Komponenten. Das identifizierte DAS zeigt eine betriebswirtschaftlich gute Kombination auf. Die Ausführung des genetischen, evolutionären Algorithmus erfolgt in einer adäquaten Berechnungszeit. Alle Bedingungen konnten erfüllt werden. Diese Tatsache zeigt, dass die Optimierungslösung stabil im Hinblick auf den untersuchten Use Case ist. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt ergänzend, dass bei jedem identifizierten DAS eine Komponente aus dem TS-Pool gewählt wurde, wie im Labor Use Case mit derselben Begründung (vgl. Kapitel 9.1.3).

9.3 Einfluss von Werker-Profilen auf die Ergebnisse

Im Folgenden wird eine Sensitivitätsanalyse bezugnehmend auf die Ergebnisplausibilität unter Berücksichtigung unterschiedlicher Werker-Profile durchgeführt. Die Unterscheidung basiert dabei auf einer Veränderung des Performance Shape Faktors 3 (PSF₃). Während bislang in den Use Cases stets S₃ mit 2,5 angegeben wurde, werden nachfolgend Werker-Profile links und rechts dieser Ausprägungsform betrachtet. Die Plausibilität, der durch den Einsatz des Vorgehensmodells identifizierten DAS Komponenten, folgt dabei der Annahme, dass je geringer das individuelle Werker-Profil in Bezug auf die Einflussfaktoren des PSF₃ – p₁ bis p₅ – ist, umso entsprechend höher ist die Werkerqualifikation definiert und umso geringer ist der Autonomie-Grad des DAS. Diese getroffene Annahme folgt der Zielsetzung DAS, die Anforderungen einer Montagetätigkeit und die daraus resultierende Belastung der Werker bestmöglich auszugleichen. Ferner sind mit höheren Autonomiegraden komplexere und vielfach auch höhere Investitionen in Komponenten verbunden. Für den Zweck einer entsprechenden Analyse erfolgt eine fiktive Zuordnung unterschiedlicher Autonomiegrade (AD) zu den einzelnen Komponenten DAS. Im Zuge einer Autonomiegraddefinition wird ein Intervall von 0 (sehr gering ausgeprägter Autonomiegrad) bis 1 (sehr stark ausgeprägter Autonomiegrad) zu Grunde gelegt [75].

Komponenten des T-Pools werden dabei aus dem Blickwinkel einer autonomen Konfiguration, Parametrisierung und in Bezug auf eine autonome Dokumentation von etwaigen Prozessparametern, mit welchen die Montagetätigkeit durchgeführt wird, in Hinblick auf den Autonomiegrad betrachtet. Da die in dem Vorgehensmodell berücksichtigten Komponenten diese Funktionen abbilden, werden alle Komponenten des T-Pools in Bezug auf ihren Autonomiegrad mit der Ziffer 1 bewertet. Die Komponenten des D-Pools werden im Zuge der Definition des jeweiligen Autonomiegrads hinsichtlich ihres manuellen Interaktionsaufwands und ihres Mobilitätsgrads bewertet. Aus der Perspektive des manuellen Aufwands des Werkers werden die Komponenten des TS-Pools im Zuge der Definition eines Autonomiegrads definiert. Je größer der manuelle Aufwand des Werkers in der Interaktion mit einer TS-Komponente ist, umso geringer wird der Autonomiegrad der Komponente bewertet. Während das IR-Pool im Zuge einer Autonomiegrad-Definition nicht betrachtet wird, da eine plausible Zuordnung entsprechender Definitionen nicht möglich ist, erfolgt eine Autonomiegrad-Definition in Bezug auf die Komponenten des II-Pools. Die Definition von Autonomiegraden der einzelnen Komponenten des II-Pools erfolgt dabei erneut aus dem Blickwinkel des manuellen Aufwands zur Bereitstellung der erforderlichen Grunddaten eines DAS.

Während bei der Komponente II_1 eine reine manuelle Eingabe in das DAS Informationssystem erfolgt, sind bei der Komponente II_2 zunächst die entsprechenden Stammdaten beispielsweise aus einem ERP-Systems zu hinterlegen und die entsprechenden Schnittstellen zu dem Informationssystem zu implementieren. Bei der Komponente II_3 werden die erforderlichen Grunddaten autonom [64] erzeugt. Das IS-Pool wird nicht betrachtet, da es sich hierbei um das Technology Readiness Level zur Orchestrierung der unterschiedlichen Komponenten handelt. Ein Überblick über die Zuordnung der einzelnen Autonomiegrade der verschiedenen DAS Komponenten wird in Abbildung 83 im Anhang gegeben. Gemäß den in dem entwickelten Vorgehensmodell definierten Nebenbedingungen beträgt der am höchsten ausgeprägte Autonomiegrad unter Vernachlässigung gewählter Komponenten aus dem T-Pool 4, da diese direkt mit den verwendeten Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen korrelieren.

Folgende fünf verschiedene Werker-Profile (CL_1 bis CL_5) werden näher betrachtet. Die Reaktionszeit (p_3) wird als gleichbleibend angenommen. Die Reihung der Werker-Profile beginnt mit einem geringen Qualifikationsprofil und endet mit einem hohen Qualifikationsprofil. Folgende Tabelle stellt die Werker-Profile dar.

Tabelle 82: Zusammensetzung der Werker-Profile (CL_1 bis CL_5) (eigene Darstellung)

PSF3 - Personalfaktoren		CL_1	CL_2	CL_3	CL_4	CL_5
p_1	Erfahrung	1,00	0,75	0,50	0,25	0,00
p_2	Aufmerksamkeit	1,00	0,75	0,50	0,25	0,00
p_3	Reaktionszeit	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
p_4	Motivation	1,00	0,75	0,50	0,25	0,00
p_5	Andere Faktoren	1,00	0,75	0,50	0,25	0,00
Summe		4,50	3,50	2,50	1,50	0,50

Mit dem PoC-Demonstrator ist unter Berücksichtigung der verschiedenen Werker-Profile eine unveränderte Montagetaetigkeitsabfolge analysiert worden. Bei der betrachteten Montagetaetigkeit ist jeweils die Integration eines Schraubensystems identifiziert worden. Folgende Ergebnisse wurden vor dem Hintergrund der betrachteten Werker-Profile ermittelt.

Tabelle 83: Korrelationsergebnisse zwischen Werker Kompetenz und Autonomiegrad (eigene Darstellung)

Kompetenzlevel des Werkers		Kompetenzlevel (CL)	Autonomiegrad (AD)	Autonomiegrad des DAS	
CL_1	sehr gering	4,50	4,20	sehr hoch	AD_1
CL_2	gering	3,50	3,70	hoch	AD_2
CL_3	mittel	2,50	2,20	mittel	AD_3
CL_4	hoch	1,50	2,00	gering	AD_4
CL_5	sehr hoch	0,50	1,75	sehr gering	AD_5

Durch Verwendung des PoC-Demonstrators ist darüber hinaus ein Zusammenhang zwischen den betrachteten Werker-Profilen und der zu erzielenden Amortisationszeit des identifizierten DAS festgestellt worden. Während von einem gering ausgeprägten Werker-Profil eine kurze Amortisationszeit determiniert wird, zeigt sich bei stark ausgeprägten Werker-Profilen eine lange Amortisationszeit. Vor dem Hintergrund der betrachteten Montageaufgabe wurde ein erheblicher Sprung in Bezug auf die Amortisationszeiten zwischen den Qualifikationsprofilen CL₃ und CL₄ sowie zwischen den Qualifikationsprofilen CL₄ und CL₅ identifiziert, wie Tabelle 84 darstellt.

Tabelle 84: Übersicht der ermittelten Amortisationszeiten (eigene Darstellung)

Kompetenzlevel des Werkers	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₄	CL ₅
Amortisationszeit in Jahren	2,28	3,26	7,07	19,49	61,49

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine adäquate Berücksichtigung unterschiedlicher Ausprägungen von Werker-Profilen durch das Vorgehensmodell gegeben ist. Die Ergebnisplausibilität des Vorgehensmodells ist zwischen Werker-Qualifikation, Autonomiegrad und Amortisationszeit gegeben.

9.4 Kritische Reflexion und Zusammenfassung

Mittels einer SWOT-Analyse werden in diesem Kapitel zunächst Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des entwickelten Vorgehensmodells aufgezeigt und anschließend Handlungsfelder zur Modifikation des Vorgehensmodells im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit abgeleitet [96]. Die Betrachtung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken erfolgt nach folgenden Bewertungskriterien [198] [199] [200]:

- Gültigkeit (Validität) des entwickelten Vorgehensmodells
- Effektivität des entwickelten Vorgehensmodells
- Effizienz des entwickelten Vorgehensmodells
- Nutzbarkeit (Anwendbarkeit) des entwickelten Vorgehensmodells

Mit Hilfe des entwickelten Vorgehensmodells sind betriebswirtschaftlich quantifizierte Aussagen zu Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten DAS in der Montage identifizierbar, auf Basis einer Bewertung einzelner DAS Komponenten im Hinblick auf die Bildung eines ganzheitlichen und umsetzbaren DAS. Die betriebswirtschaftliche Bewertung und die Auswahl von Komponenten folgt dabei nach einer Vorselektion auf Basis von Werker-/Montageteam-Profilen. Auf Grund der Tatsache, dass die betriebswirtschaftliche Quantifizierung mit sowohl fixen als auch variablen Investitionserfordernisse in Soft- und Hardwaresysteme verbunden ist, welche auf dem Markt gewissen

Schwankungen unterliegen, und dass der Implementierungsaufwand durch stets einfacher miteinander zu verknüpfenden Systemen kontinuierlich reduziert wird, ermöglicht die tabellarische Struktur des entwickelten Vorgehensmodells jederzeit eine Anpassung an die aktuellen Marktpreise und Implementierungsaufwände.

Die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells wurde anhand mehrerer Use Cases validiert. Das Vorgehensmodell liefert bei der Anwendung stets nachvollziehbare und plausible Ergebnisse. Es ist davon auszugehen, dass eine Plausibilität der Ergebnisse auch bei Anwendung auf weitere Use Cases gegeben ist. Die Datenstruktur und die Analyseschritte ermöglichen eine gute Modifikation der definierten Zusammenhänge. Dadurch können neue Erkenntnisse sowie neue DAS Komponenten jederzeit in dem Vorgehensmodell ergänzt werden. Bei der Anwendung des Vorgehensmodells auf die Use Cases ist stets eine repräsentative Lösung gefunden worden. Dabei ist zu beachten, dass die von dem Vorgehensmodell generierten Ergebnisse als Tendenzaussagen zu verstehen sind. Dies ist einerseits mit der relativen Neuheit DAS in der praktischen Anwendung verbunden und andererseits mit fehlenden Erfahrungswerten, welche in Zukunft durch Beobachtungsstudien weiter zu erheben sein werden. Die tabellarische Datenstruktur des Vorgehensmodells ermöglicht es, eine Anpassung auf Basis weiterer Erkenntnisse durchzuführen. Dadurch kann die Lösung, die durch das Vorgehensmodell generiert wird, gesteuert werden. Durch standardisierte Anwendung des Vorgehensmodells ist eine exakte Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Montagesystemen und -stationen gegeben.

Als PoC-Demonstrator basiert das Vorgehensmodell auf Microsoft-Excel [201] und dem als Add-On in Excel installierbaren SOLVER [202]. Da das IT-System Microsoft-Excel-Office nach wie vor in der Industrie weit verbreitet ist, ist mit dem Vorgehensmodell ein geringer Implementierungs- und Anwendungsaufwand verbunden. Durch entsprechende programmierte VBA-Makros wird der Benutzer durch den PoC-Demonstrator geleitet, was eine intuitivere Benutzung ermöglicht. Die einzelnen durch den genetischen, evolutionären Algorithmus generierten Iterationsergebnisse sind bei Bedarf ergänzend einsehbar. Die wesentlich benötigten Input-Daten basieren auf einer erweiterten MTM-UAS Analyse. Auf Grund der Tatsache, dass MTM-UAS Analysen in der Industrie weit verbreitet sind, entsteht für Industrieunternehmen, die MTM-UAS einsetzen, lediglich ein überschaubarer Mehraufwand, die benötigten Input-Daten zu erheben. Das Vorgehensmodell basiert vor allem auf der Analyse von produkt- und variantenspezifischen Tätigkeitsanalysen, welche mittels MTM-UAS Standardprozesselementen modellierbar sind. Dadurch ist das Vorgehensmodell für Industrieunterneh-

men, welche differenzierende MTM-Methodenniveaus nutzen, wie in der Einzelfertigung (MTM-MEK) in der aktuellen Version nicht anzuwenden. Da jedoch MTM-MEK ebenso wie MTM-UAS auf dem Methodenniveau MTM-1 basieren und MTM-1 eine detaillierte Informationsgrundlage als MTM-UAS oder auch als MTM-MEK darstellt [86], ist grundsätzlich eine Modifikation der Methode hinsichtlich einer Datenanalyse auf MTM-1 Niveau denkbar. Bei der Anwendung des Vorgehensmodells zeigte sich, bezugnehmend auf die benötigten manuellen Eingaben der erforderlichen Performance Shape Faktoren p_1 - p_5 sowie bezugnehmend auf die benötigten Beschreibungsfaktoren zur Kalkulation der Einlern- und Trainingszeit, eine Subjektivität. Hier wird ein Anpassungsbedarf aufgezeigt.

Eine Anwendung des Vorgehensmodells abseits der Montage ist aktuell nicht gegeben. Bei der Entwicklung des Vorgehensmodells sind jedoch vielfach allgemeine Beschreibungsparameter DAS berücksichtigt. Durch Analyse und Modifikation der Einfluss- und Wirkzusammenhänge im Hinblick auf entsprechende Tätigkeiten ist es denkbar, das Vorgehensmodell in weiteren Produktionsbereichen anzuwenden. Die Struktur des Vorgehensmodells ermöglicht diesbezüglich eine Modifikation und Anpassung. Dabei stellen die Modifikationen und Anpassungen des PoC-Demonstrators auf Grund seiner Komplexität einen hohen Aufwand dar. Durch eine Transformation des entwickelten PoC-Demonstrators in ein datenbankbasiertes Softwaresystem ist zu erwarten, dass dieser Aufwand reduziert werden kann. Die Transformation des PoC-Demonstrators in ein datenbankbasiertes Softwaresystem trägt zu einer Reduktion der benötigten Rechenzeit bei. Vor dem Hintergrund der betrachteten Use Cases ist die benötigte Rechenzeit als akzeptabel anzusehen. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass, je komplexer die Tätigkeiten, je mehr Produkte und Produktvarianten aber auch je mehr DAS Komponenten analysiert werden, die Rechenzeit entsprechend länger ist.

Als Chance zur Weiterentwicklung des Vorgehensmodells ist neben der Transformation des PoC-Demonstrators in ein datenbankbasiertes Softwaretool die Modifikation des Vorgehensmodells im Hinblick auf seine Anwendung in weiteren Produktionsbereichen zu sehen. Darüber hinaus stellt eine Erweiterung des Vorgehensmodells mit Berücksichtigung weiterer MTM Methodenniveaus eine zusätzliche Möglichkeit dar. Ferner wird in einer Erhöhung der Objektivität der manuell einzugebenden Performance Shape Faktoren p_1 - p_5 sowie der benötigten Beschreibungsfaktoren zur Kalkulation der Einlern- und Trainingszeit eine weitere Chance gesehen. Als vielversprechend erscheint auch eine automatisierte Anwendung des Vorgehensmodells in einer

entsprechenden Unternehmens-IT-Landschaft. Der Aufwand für die manuelle Dateneingabe kann dadurch weiter reduziert werden. Eine automatisierte Anwendung per Mouse Klick ist denkbar, wodurch die intuitive Bedienbarkeit weiter verbessert wird.

Durch die generierten Ergebnisse besteht das Risiko der Verschiebung von stationspezifischen Montagezeiten im Hinblick auf ein vorliegendes Line-Balancing. Dieses Risiko besteht vor allem bei einem Einsatz von DAS, welche über keine Komponenten des TS-Pools verfügen. Durch fehlende Komponenten aus dem TS-Pool besteht das Risiko einer längeren Ausführungszeit, welche aus der Interaktion mit dem DAS resultiert. Gleichzeitig besteht durch integrierte Dokumentations- und Protokollierungstätigkeiten oder durch den Wegfall von Korrektur-, Such- und Einstellungszeiten die Möglichkeit, dass sich Ausführungszeiten ändern. Wie die angeführten Use Cases zeigen, hat keine der gefundenen Lösungen nicht über eine Komponente des TS-Pools verfügt, wodurch sich die Ausführungszeiten nicht erhöht haben. Doch bei entsprechenden Tätigkeiten, Produkten und Produktvarianten sowie einem entsprechenden Produktionsprogramm ist es nicht auszuschließen, dass ein DAS Komponenten aus dem TS-Pool nicht enthält (vgl. Nebenbedingung) und daraus längere Ausführungszeiten resultieren. Das entwickelte Vorgehensmodell basiert vor allem auf Informationen erweiterter MTM-UAS Analysen und unterliegt demnach der MTM-Bezugsleistung [201]. Dies ermöglicht, dass Ergebnisse miteinander objektiv vergleichbar sind. Jedoch basieren die einzelnen MTM-TMU Werte auf statistischen Annahmen [86]. Vor diesem Hintergrund ist darauf hinzuweisen, dass auch die Ergebnisse des entwickelten Vorgehensmodells untereinander gut vergleichbar sind und die generierten Ergebnisse als objektiv zu bewerten sind, dass jedoch die absolut ermittelten Ergebnisse einer statistischen Betrachtung folgen und demnach Tendenzergbnisaussagen darstellen.

Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken werden im Folgenden Anpassungsempfehlungen an das Vorgehensmodell abgeleitet. Hierzu gilt es,

- im Zuge einer Anwendung in weiteren Produktionsbereichen die Datenanalyse auf Basis von MTM-1 zu erweitern und entsprechende Regelwerke zu definieren.
- im Zuge einer Anwendung in weiteren Produktionsbereichen den Aufbau sowie die Struktur anzupassen.
- den PoC-Demonstrator in ein datenbankbasiertes Softwaretool zu überführen, um eine flexiblere Modifikation der formalen Datenstruktur und Datenanalyse zu ermöglichen. Ergänzend wird durch ein datenbankbasiertes Softwaretool das Finden einer Lösung auch für komplexerer Arbeitssysteme schneller möglich.

- den PoC-Demonstrator in ein datenbankbasiertes Softwaretool zu überführen, um die Nutzung vorhandener Unternehmensdaten zu verbessern. Der Aufwand der manuellen Eingaben wird reduziert.

Um mit den bestehenden Stärken des Vorgehensmodells die aufgezeigten Risiken abzuwehren, gilt es:

- die Ergebnisausgaben mit Kommentaren und Hinweisen auf die MTM-Bezugsleistung zu versehen, um die Gefahr einer falschen Interpretation zu reduzieren.
- einen multikriteriellen Algorithmus zum Line-Balancing [204] in das Vorgehensmodell zu implementieren, um bei Veränderung der Tätigkeitsausführungszeiten eine effiziente Austaktung der Montage zu gewährleisten.
- kontinuierlich Studien zur Evaluierung von Wechselwirkungen von neuen Komponenten im Hinblick auf ein ganzheitliches Assistenzsystem sowie zur Identifikation von Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten und möglichen, auf den Menschen wirkenden Einflüssen durchzuführen.
- den PoC-Demonstrator in ein datenbankbasiertes Softwaretool zu überführen, um neu gewonnene Erkenntnisse von Wechselwirkungen in Bezug auf neue Komponenten DAS sowie daraus resultierende Einflüsse auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte und Werker-Belastungen einfacher und transparenter zu ergänzen.

10 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit, welche anschließend vor dem Hintergrund der aufgestellten Zielsetzungen dieser Arbeit diskutiert werden. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Grenzen des Vorgehensmodells, wovon weitere Forschungsbedarf abgeleitet und dargestellt wird.

10.1 Zusammenfassung

Das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage zeigt, welche Möglichkeit besteht, mit der Verwendung von MTM-UAS Analysen, ein DAS zu planen und zu evaluieren, das menschenorientiert ist, und die Wirtschaftlichkeit und Produktivität von Werkern und Arbeitssystemen berücksichtigt. Vor dem Hintergrund kontinuierlich kleiner werdenden Losgrößen sowie einem kontinuierlichen Wachstum von Produktfamilien und Produktvarianten folgen innerhalb der letzten Jahrzehnten vermehrt Industrieunternehmen dem Prinzip der sogenannten Mixed-Modell-Montage mit dem Ziel, bestehende Montageinfrastruktur bestmöglich kapazitiv auszulasten. Durch die steigende Flexibilität und hybride Teilautomatisierung der Montageinfrastruktur ist es aus technologischer Sicht vielfach ermöglicht worden, die vom Kunden geforderte Flexibilität in Montagesystemen zu realisieren. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird vom Werker erwartet, dass er in der Lage ist, Produkte schnellst möglich und hoch profitabel zu montieren. Dabei führen kleiner werdende Losgrößen dazu, dass ein Werker im Vergleich zu größeren Losgrößen immer weniger die Möglichkeit erhält, Routinetätigkeiten auszuführen. In einer komplexen Montage bedeutet dies, dass der Montageauftrag für den Werker einen völlig neuen Montageinhalt darstellt, den der Werker hoch effizient durchführen muss. Der Mensch in der Montage ist dadurch schlussendlich das Stellglied, welches Flexibilität, Wirtschaftlichkeit und Produktivität in einem Montagesystems gewährleistet [45]. Durch dynamische Produktwechsel in der Montage steigt jedoch die Komplexität des Arbeitssystems und das Risiko einer kognitiven Belastung des Werkers. Damit steigt gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit von menschlichen Fehlern, Prozessstabilität und Qualität kommen unter Druck, was die angestrebte Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätssteigerung einer Mixed-Modell-Montage in Gefahr bringt. DAS stellen Möglichkeiten dar, das Risiko kognitiver Belastungen für den Werker zu reduzieren und Prozessstabilität zu gewährleisten.

Wie Kapitel 5 dieser Arbeit verdeutlicht, existiert jedoch das eine DAS nicht. Vielmehr besteht die Herausforderung, DAS auf Basis von Funktionen und Merkmalen ihrer Teil-

komponenten im Hinblick auf menschenorientierte und gleichzeitig betriebswirtschaftliche Erfordernisse zu gestalten. Vor diesem Hintergrund wird in Kapitel 5 zunächst ein strukturierter Morphologischer Kasten entwickelt, in welchem nach unterschiedlichen Funktionen dem Aufbau eines modernen DAS folgend vielfältige technische DAS Komponenten aufgezeigt werden und nach unterschiedlichen Beschreibungsparametern beziehungsweise auf ihren Einsatz dargestellt werden. Dabei wird aufgezeigt, dass es möglich ist, auf Grundlage einer erweiterten MTM-UAS Analyse eine Verknüpfung zwischen einer Arbeitsaufgabe, menschlichen Eigenschaften und DAS Komponenten auf Grundlage von Tendenzkennzahlen zu erzeugen. Während Kapitel 5 dieser Arbeit Komponenten DAS und Möglichkeiten zur Verknüpfung mit Beschreibungsparametern einer Montageaufgabe verbindet, werden in Kapitel 6 die zentralen Einflüsse und Zusammenhänge zwischen Produktivitätseffekten durch DAS in Bezug auf den Menschen, welcher mit seinen spezifischen Eigenschaften in Kapitel 6 beschrieben wird, und in Bezug auf das Arbeitssystem aufgezeigt. Es wird dargestellt, welche Möglichkeiten und Einflüsse DAS und technischen DAS Komponenten auf die Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit sowie auf die HEP in positiver als auch in negativer Form haben. Dabei verdeutlicht das Kapitel, auf welche Weise eine Möglichkeit zu einer quantitativen Bestimmung der Einflussnahme DAS auf Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit sowie auf die HEP besteht. Wie bei der Berechnung von Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit sowie HEP wird verdeutlicht, dass es für diese Bestimmung einer erweiterten MTM-UAS Analyse bedarf.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Kapiteln 5, 6 und 7 werden in Kapitel 8 im Hinblick auf ein Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS auf Basis einer mathematischen Formulierung verbunden. Hierzu erfolgt zunächst eine ganzheitliche Beschreibung der identifizierten Zusammenhänge zwischen Mensch, Technologie und Arbeitsaufgabe (Organisation), stets repräsentiert durch eine MTM-UAS Analyse. Die Einflüsse der DAS Komponenten auf die Ausführungs-, Einlern- und Trainingszeit sowie auf die HEP werden dabei in Bezug auf korrelierende Investitionserfordernisse ergänzt. Diese getroffenen Annahmen folgen gewonnenen Erkenntnissen aus Beobachtungsstudien, welche während der Integration unterschiedlicher DAS in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 ermittelt worden sind. Die Tatsache, dass die getroffenen Annahmen auf Grund der dargestellten und ausgeführten Tabellenstruktur jederzeit spezifizierbar und erweiterbar sind, ermöglicht eine grundlegende Belastbarkeit des hinter den Annahmen stehenden Regelwerks. Das entwickelte Vorgehensmodell erlaubt es, ein DAS für ein Arbeitssystem als integrativen Bestandteil der Arbeitsvorbereitung zu planen. In diesem Zusammenhang wurde für die Priorisierung und Auswahl

der Komponenten eines DAS das Prinzip eines genetischen Algorithmus gewählt, entsprechende Nebenbedingungen definiert und mathematisch beschrieben.

Auf Basis des in Kapitel 8 entwickelten Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS wird in Kapitel 9 das Vorgehensmodell validiert. Hierzu erfolgt zunächst die Entwicklung und Darstellung eines Microsoft-Excel basierten PoC-Demonstrators, welcher eine gute Anwendbarkeit des entwickelten Vorgehensmodells auf Use Cases einer Mixed-Modell-Montage ermöglicht. Die Anwendung des Vorgehensmodells in den Use Cases zeigt, dass das Vorgehensmodell zum einen in die klassischen Phasen der Montageplanung gut integrierbar ist und zum anderen, dass eine Identifikation eines menschengerechten und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit und Produktivität eines Arbeitssystems berücksichtigenden DAS auf der Grundlage der erweiterten MTM-UAS Analyse von Produkten und deren Varianten ermittelbar ist. Ferner wurde verdeutlicht, dass die Anwendung des Vorgehensmodells mit einem moderaten Aufwand für den Benutzer erfolgen kann, sofern die benötigten Input-Daten vorhanden sind und die ermittelten Ergebnisse stets dem entwickelten und beschriebenen Regelwerk folgen.

Damit wurden die in Kapitel 4.3 formulierten Anforderungen 1 – 7 an das zu entwickelnde Vorgehensmodell wie folgt erfüllt.

Tabelle 85: Darstellung der Anforderungserfüllung des Vorgehensmodells (eigene Darstellung)

Nr.	Anforderungen	Erfüllung
1	Verwendung der Arbeitsaufgabe als verknüpfendes Glied der sozialen und technischen Systeme sowie zur Verbindung des Menschen und der organisatorischen Strukturen	Über die Darstellung der Arbeitsaufgabe in Form einer erweiterten MTM-UAS Analyse konnte ein verbindendes Glied zwischen menschlichen, technischen und organisatorischen Aspekten geschaffen werden. Die Anforderung ist als ausreichend erfüllt zu betrachten.
2	Beachtung individueller Mitarbeiterprofile (Mensch)	Durch Verwendung von Performance Shape Faktoren sowie durch die Beachtung spezifischer Mitarbeiterereigenschaften ist eine grundlegende Beachtung individueller Mitarbeiterprofile erfolgt. Die Anforderung ist als ausreichend erfüllt zu betrachten.
3	Beachtung von Informations- und Kommunikationstechnologien, wie DAS und damit verbundene Investitionen (Technologie)	Durch die Definition und Beschreibung der einzelnen Komponenten DAS auf Technologieebenen im Hinblick auf deren Einflüsse zu Investitions- und Implementierungsaufwänden sowie in Bezug auf deren morphologische Kombinationsmöglichkeiten ist die Anforderung als ausreichend erfüllt zu betrachten.
4	Beachtung von quantifizierbaren Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten (Organisation)	Durch die Definition und Beschreibung der einzelnen Komponenten DAS im Hinblick auf deren Einflüsse auf Ausführungszeiten, Einlern- und Trainingszeiten sowie zeitlich bewerteter menschlicher Fehler, ist die Anforderung als ausreichend erfüllt zu betrachten.

5	Beachtung einer praxisorientierten Anwendung in frühen Phasen der Produktentwicklung beziehungsweise Integrierbarkeit in die Phasen der Montageplanung	Durch konsequente Bezugnahme auf die verwendete MTM-UAS Methode sowie durch die Anwendung des Vorgehensmodells auf einen Praxis Use Case ist von einer praxisorientierten Anwendung auszugehen. Die Anforderung ist als ausreichend erfüllt zu betrachten.
6	Beachtung individueller Tätigkeiten innerhalb einer Mixed-Model-Montage	Der Aufbau und die Struktur des Vorgehensmodells folgen den Anforderungen einer Mixed-Modell Montage. Die Validierung des Vorgehensmodells zeigt, dass das Modell zur Betrachtung mehrerer Produkte mit unterschiedlichen Produktionsvolumen auf gleicher Montageinfrastruktur anwendbar ist. Die Anforderung ist als erfüllt zu betrachten.
7	Beachtung von quantifizierbaren Zeiterfordernissen	Durch konsequente Bezugnahme auf die verwendete MTM-UAS Analyse, sind Zeiterfordernisse quantifiziert worden. Die Anforderung ist als erfüllt zu betrachten.

10.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden, die durch die Entwicklung des Vorgehensmodells identifizierten Erkenntnisse und Ergebnisse hinsichtlich ihres Beitrages zur Zielsetzung sowie zu den Subzielsetzungen dieser Arbeit erörtert.

Zur Zielsetzung: *Entwicklung eines adäquaten Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage, welches in klassische Phasen der Montageplanung integrierbar ist.*

Das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage zeigt, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen Beschreibungs- und Einflussfaktoren zu beachten sind, um eine adäquate Entscheidungsgrundlage für oder gegen eine Investition und Implementierung DAS zu schaffen. Während vielfach die wissenschaftliche Literatur Stellung zu einzelnen technischen Aspekten DAS bezieht, verdeutlicht diese Arbeit, dass für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz DAS nicht ausschließlich die Technik entscheidend ist, sondern ein den Merkmalen des Werkers und der Arbeitsaufgabe entsprechende Vorgehensmethode. Hierzu ist eine ganzheitliche Betrachtung und Verknüpfung einzelner Aspekte, Merkmale und Eigenschaften von Mensch, Technik und Organisation (hier vor allem der Arbeitsaufgabe) erforderlich. Dabei zeigt sich, dass neben der Vielzahl der Beschreibungs- und Einflussfaktoren auch deren Verknüpfungen nicht trivial, sondern zum Teil sehr vielschichtig sind. Durch Analyse der einzelnen DAS Komponenten in Bezug auf ihren Einfluss auf zentrale Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte in Verbindung mit Eigenschaften von Menschen und Arbeitsaufgabe ist es gelungen, ein adäquates Vorge-

hensmodell zur Planung und Evaluierung DAS zu entwickeln. Die dargestellten Korrelationsbeziehungen weisen jedoch eine hohe Komplexität auf, sodass die Anwendung des Vorgehensmodells auf einem software-basierten PoC-Demonstrator erfolgt, welcher auf Basis einer erweiterten MTM-UAS Analyse Informationen und Daten extrahiert, verarbeitet und bewertet, sodass ein kritischer Pfad eines DAS Designs innerhalb der entwickelten Morphologie DAS bestimmbar ist und ein spezifisches DAS, in Bezug auf eine quantitative Aussage zur Produktivität von Werker und betriebswirtschaftlicher Vor- und Nachteilhaftigkeit identifizierbar ist. Eine MTM-UAS Analyse ist in vielen Industrieunternehmen vorhanden. Durch Verbindung mit Informationen aus CAD-Files ist es möglich, die als Input-Daten benötigte erweiterte MTM-UAS Analyse zu erstellen. Das entwickelte Vorgehensmodell ist daher in frühen Phasen der Montageplanung anwendbar.

Zu Subzielsetzung 1: *Identifikation zentraler Beschreibungsparameter, Produktivitätseffekte, um einen menschenorientierten und betriebswirtschaftlich sinnvollen Einsatz DAS in der Montage zu bestimmen. Hierzu gilt es, Einflüsse, Wechselwirkungen und Zusammenhänge innerhalb des MTO-Konzeptes zu beschreiben.*

Kapitel 5 dieser Arbeit stellt die zentralen Komponenten DAS sowie deren Funktionen und Einflüsse entlang der entwickelten Morphologie DAS dar und zeigt unterschiedliche Einflussfaktoren zur Bestimmung und Beschreibung notwendiger Komponenten bezugnehmend auf organisatorische Arbeitsmethodenbeschreibungen auf. Dabei wird nicht nur aufgezeigt und verdeutlicht, in welchen Abhängigkeiten DAS Komponenten stehen, sondern auch mit welchen menschlichen Eigenschaften und organisatorischen Anforderungen diese Komponenten DAS verbunden sind. Auf Kapitel 5 und 6 folgend stellt Kapitel 7 dar, welche grundlegenden Einflüsse technische DAS Komponenten im Hinblick auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte haben und welche Wechselwirkungen zwischen ihnen und dem Menschen bestehen. Es wird dabei verdeutlicht, dass die DAS Komponenten unterschiedliche Einflüsse auf die Ausführungszeit (MTME), die Einlern- und Trainingszeit (LEARNE) sowie auf die HEP (HEPE) haben. Durch eine Untersuchung in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 ist es gelungen, jede in dieser Arbeit betrachtete Komponente DAS einzeln auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte auf Menschen und Arbeitssystem (MTME, LEARNE, HEPE) zu bewerten. Subzielsetzung 1 ist mit dieser Arbeit erreicht worden.

Zu Subzielsetzung 2: *Entwicklung eines mathematischen Regelwerks zur Bestimmung von Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte DAS.*

Die Entscheidung für die einzelnen Komponenten und damit für DAS erfolgt stets unter Berücksichtigung von Eigenschaften und Anforderungen von Mensch und Organisation auf Basis der Arbeitsaufgaben, welche in einem mathematischen Regelwerk in Kapitel 8 dieser Arbeit beschrieben wird.

Es wird in dieser Arbeit dargestellt, wie durch Unterteilung der Komponenten DAS in die Technologie-Pools D, T, TS, IR und II, Einflüsse aus einer Montagesituation mit Wirtschaftlichkeits und Produktivitätseffekten DAS quantifizierbar sind. Dabei werden abgeleitete Beschreibungsparameter von Mensch und Organisation mit der entwickelten Morphologie DAS verbunden und unterschiedliche technische Ausprägungen DAS (kritischen Pfades) bewertet. Jenes DAS, welches aus menschenorientierter und betriebswirtschaftlicher Sicht vorteilhaft ist, wird ausgewählt. Die Kapitel 5, 6 und 7 stellen zentrale Beschreibungsparameter zur Bedarfsidentifikation sowie zu Auswirkungen von Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekten auf Werker und Arbeitssystem dar. In Kapitel 8 gelingt es, diese einzelnen Parameter zusammenzuführen und innerhalb eines Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS darzustellen sowie unterschiedliche Korrelationsbeziehungen zu verdeutlichen. Dabei sind die identifizierten Korrelationsbeziehungen zwischen den einzelnen Beschreibungsparametern in Bezug auf Mensch, Technik und Organisation mathematisch formuliert worden. Die in Kapitel 9 durchgeführten Validierungsstudien bestätigen die grundlegende Richtigkeit der Korrelationszusammenhänge. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich dabei um eine Validierung des Vorgehensmodells und nicht um eine empirische Bestätigung der Korrelationsbeziehungen handelt, hierzu sind weiterführende Studien mit einer Vielzahl unterscheidbarer Montageinhalte und Probanden durchzuführen, was zur Gänze in dieser Arbeit nicht möglich ist. Die tabellarische Struktur des Excel basierten PoC-Demonstrators, welche das entwickelte Vorgehensmodell zur Anwendung befähigt, macht es möglich, jederzeit Ergänzungen und Modifikationen vorzunehmen. Die grundlegenden Zusammenhänge wurden im Rahmen dieser Arbeit durch mannigfaltige Beobachtungsstudien und Befragungen in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 bestätigt. Subzielsetzung 2 ist mit dieser Arbeit erreicht worden.

Zu Subzielsetzung 3: *Ermöglichung von quantitativen Entscheidungen zur Implementierung und Nutzung eines DAS auf Basis von Daten der Methode MTM, welche typischer Weise in der Montageplanung zum Einsatz kommt.*

Das entwickelte Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage verdeutlicht, dass eine Bestimmung des für Werker und Arbeitssystem vorteilhaften DAS durch eine erweiterte MTM-UAS Analyse möglich ist. Es wird dargestellt, wie die

hinter den jeweiligen MTM-UAS Prozessbausteinen enthaltenen Informationen nutzbar sind, um die erforderlichen Beschreibungsparameter der Komponenten DAS qualitativ und quantitativ zu bestimmen und dadurch einzelne DAS Komponenten den Anforderungen zuzuordnen und Implementierungsaufwände sowie Nutzeneffekte (Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte) zu bestimmen. Hierzu ist es notwendig, die klassische MTM-UAS Analyse um Informationen zum Materialeinsatz, zur Arbeits- und Montageposition, sowie um Informationen zu verwendeten Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen zu ergänzen. Aufgrund der Tatsache, dass sich eine klassische MTM-UAS Analyse an der sogenannten Normalleistung orientiert, also an jener Leistung, die ein durchschnittlicher Mensch über einen durchschnittlichen Arbeitstag von acht Stunden hinweg ohne zusätzliche Ermüdung in einem Arbeitssystem erbringen kann, benötigt das entwickelte Vorgehensmodell weitere Informationen über den individuellen Werker oder über das individuelle Montageteam. Hierzu sind spezifische Daten zu den sogenannten Performance Shape Factors und im Speziellen zu den PSF₃ Faktoren ergänzt mit Informationen zu Geschlecht und Alter der Werker / des Montageteams anzugeben. Im Zuge der Bestimmung der Produktkomplexität, welche einen erweiterten Einfluss auf die kognitive Belastung von Werker, beziehungsweise des Montageteam ausübt, ist es ergänzend erforderlich, die einzelnen zu verbauenden Materialien entsprechend der vom SAMY und EIMARAGHY (2010) [123] entwickelten Taxonomie der Produktkomplexität zuzuordnen. Um eine quantitative Aussage zur Entscheidung für Implementierung und Nutzung DAS zu treffen, sind weitere Informationen in Bezug auf Produktionsvolumen, Angaben zu Kostensätzen von Werkern beziehungsweise von Montageteams, von IT- und Administrationsmitarbeitern notwendig. Wie in Kapitel 8 dargestellt, sind auf dieser Informationsgrundlage quantitative Aussagen zur Entscheidung über die Implementierung und Nutzung eines DAS bestimmbar. Die Subzielsetzung 3 ist demnach mit dieser Arbeit erreicht worden. Mit Erreichung der Subzielsetzungen 1 bis 3 ist auch die Hauptzielsetzung dieser Arbeit erreicht worden.

Zur Forschungsfrage: *Ist eine durchgängige Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in Bezug auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseinflüsse von Werkern und Montagearbeitssystemen im Spannungsfeld des MTO-Konzepts möglich?*

Mit der Erreichung der Zielsetzung und der Subzielsetzungen dieser Arbeit sind auch Antworten zu der in dieser Arbeit adressierten Forschungsfrage gefunden worden. Hierzu sind grundlegende Beschreibungsparameter in den Kapiteln 5, 6 und 7 identifiziert, definiert und im Hinblick auf deren Einflüsse und Wechselwirkungen im Rahmen von Planungs- und Evaluierungstätigkeiten beschreiben worden. Im Zuge der Entwick-

lung des Vorgehensmodells in Kapitel 8 wurden die Beschreibungsparameter zu einem ganzheitlichen Vorgehensmodell zur durchgängigen Planung und Evaluierung zusammenfassend in den Kontext des MTO-Konzeptes gestellt und eine Verknüpfung mit der Methode MTM als aufgabengerechte Verbindung zwischen den drei Schnittmengen des MTO-Konzeptes geschaffen. Durch die Validierung des Vorgehensmodells wurden Gültigkeit, Effektivität, Effizienz sowie die Nutzbarkeit des Vorgehensmodells dargelegt, womit die grundlegende Richtigkeit der Einflüsse und Wechselwirkungen – Korrelationszusammenhänge der Dimensionen Mensch, Technik und Organisation – bestätigt wurde. Dabei ist jedoch auch im Zuge der Beantwortung der Forschungsfrage anzuführen, dass es sich bei der Validierung nicht um eine empirische Bestätigung der Korrelationsbeziehungen handelt. Im Vergleich zur Zielerreichung der Subzielsetzung 2 gilt es auch hier, weiterführende Studien mit einer Vielzahl unterscheidbarer Montageinhalte und Probanden durchzuführen, um Aussagen zur Empirie der Korrelationsbeziehungen zu machen. Die tabellarische Struktur des Microsoft-Excel basierten PoC-Demonstrators, die das entwickelte Vorgehensmodell zur Anwendung befähigt, macht es möglich, jederzeit Ergänzungen und Modifikationen vorzunehmen. Die grundlegenden Zusammenhänge wurden im Rahmen dieser Arbeit durch vielfältige Beobachtungsstudien und Befragungen in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 bestätigt. Die Forschungsfrage dieser Arbeit wurde somit beantwortet.

10.3 Ausblick

Im Rahmen der Arbeit sind verschiedene Beschreibungs- und Einflussparameter im soziotechnischen Analyse-, Bewertungs- und Gestaltungskonzept zwischen Mensch, Technik und Organisation in einem IKT-dominierten Arbeitssystem im Zuge der Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS bestimmt worden. Hierbei wurde auf bestehendes Wissen sowie auf bestehende Erkenntnisse des Industrial Engineering [88] zurückgegriffen und Erkenntnisse zu Korrelationen eines DAS mit Mensch, Technik und Organisation identifiziert. In Bezug auf den Menschen finden Beschreibungsparameter und Einflussfaktoren wie Motivation, Akzeptanz und Zeitdruck Niederschlag in der Darstellung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit. Spezifische Auswirkungen der Beschreibungsparameter und Einflussfaktoren in der Handhabung, das operative Handling mit DAS, beziehungsweise mit den Komponenten, zeigt einen weiteren spezifischen Forschungsbedarf an. Diese Parameter üben einen direkten Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit aus, werden jedoch nicht in der Handhabung des DAS, sowie in der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeitsanalyse betrachtet. Darüber hinaus werden intraindividuelle und dynamische Leistungs-

schwankungen des Werkers oder der Montageteams nicht beachtet. Die beschriebenen Korrelationsbeziehungen zwischen dem Menschen und den DAS Komponenten sind objektiv beschrieben, jedoch ist auch an dieser Stelle mit subjektiv von Menschen empfundenen spezifischen Einflüssen zu rechnen. Diesbezüglich gilt es weitere Analysen und empirisch gesicherte Ergebnisse zu gewinnen.

Im Zuge der Strukturierung der unterschiedlichen technischen DAS Komponenten wird in dieser Arbeit ein Morphologischer Kasten und unterschiedliche Technologie-Pools nach Funktionen DAS aufgezeigt. Die Struktur sowie die Pools folgen dabei Erkenntnissen über die einzelnen DAS Komponenten aus Sicht des aktuellen Technologie-marktes und der aktuellen Forschungs- und Entwicklungserkenntnisse. Da gegenwärtig sowohl auf Seiten der Technologiehersteller als auch auf Seiten der Forschungs- und Entwicklung vielfältig neue Produkte hergestellt und Erkenntnisse gewonnen werden, gilt es, die Morphologie DAS kontinuierlich aktuell zu halten. Dafür sind kontinuierliche Marktrecherchen notwendig, um zum einen die Komponenten aktuell zu halten und zum anderen die Merkmalsstrukturierung des Morphologischen Kastens kontinuierlich zu evaluieren und anzupassen. Die Anpassung des Morphologischen Kastens geht dabei kontinuierlich mit der Evaluierung der identifizierten und beschriebenen Nebenbedingungen zur Bewertung und Identifikation des menschen- und wirtschaftlichkeits-/produktivitätsgerechten Assistenzsystems einher. Grundsätzlich ist damit zu rechnen, dass die Komplexität sowohl auf Basis der Anzahl möglicher Komponenten DAS ansteigt als auch, dass die Funktionsvielfalt sowie die technische und organisatorische Abhängigkeit der Komponenten zunehmen.

Aus organisatorischer Sicht berücksichtigt das entwickelte Vorgehensmodell verschiedene Beschreibungsparameter und Einflussfaktoren in Bezug auf die durchzuführende Montagetätigkeit in einem Mixed-Model Konzept auf Basis von erweiterten MTM-UAS Analysen. Weiterführender Forschungsbedarf liegt dabei in der wissenschaftlichen Analyse der Einflüsse und Zusammenhänge zwischen Organisation, Mensch und Technik unter anderem in Bezug auf die Arbeitszeit und das gewählte Schichtmodell. Was die Input-Daten betrifft, basiert das Vorgehensmodell auf einer erweiterten MTM-UAS Analyse. Diesbezüglich besteht weiterer Forschungsbedarf zur Frage, ob es grundsätzlich möglich ist, weitere Beschreibungsansätze als Input-Daten zu nutzen, wie beispielsweise biodynamische Ersatzmodelle, welche zum Teil digitalen Menschenmodellen in Simulationsumgebungen zugrunde liegen. Ferner wird ein erweiterter Forschungsbedarf zum einen darin gesehen, ob das Methodenniveau einer MTM-UAS Analyse für sich dynamisch ändernde Mixed-Modell Konzepte in der Montage im Hinblick auf kontinuierlich gegen 1 gehenden Losgrößen ausreichend belastbar ist.

Zum anderen wird ein weiterführender Forschungsbedarf im Zuge einer Eignungsprüfung und Validierung des Vorgehensmodells hinsichtlich unterschiedlicher Methodenniveaus von MTM gesehen. Darüber hinaus entsteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der automatisierten Anwendung und Integration des entwickelten Vorgehensmodells in einer zunehmenden automatisierten und simulationsgestützten Montageplanung. Hierzu stellt Reisinger ET AL. [64] bereits einen ersten Ansatz dar, welcher darauf hin zu prüfen sein wird, inwiefern diesem Ansatz folgend Informationen nutzbar sind, um die erforderliche Input-Daten für eine automatisierte Anwendung des Vorgehensmodells bereitzustellen. Im Zuge einer vollständigen Integration des Vorgehensmodells in eine ganzheitliche Montageplanung ist darüber hinaus die bislang statische Berücksichtigung der Arbeitsinhalte zu den unterschiedlichen Montagestationen durch ein multikriterielles Line-Balancing zu erweitern. Dadurch können vor allem die daraus resultierenden Änderungen der Gesamtausführungszeit durch den Einsatz eines DAS berücksichtigt werden. Ein weiteres zentrales Forschungs- und Entwicklungsfeld stellt die Bedeutung, Integration und Nutzung DAS innerhalb eines digitalen Wissensmanagement dar [66]. Durch die Ermöglichung einer Schnittstelle zwischen Planungs-, Steuerungsmanagement und dem operativen Shopfloor der Montage, werden neue und intelligente Formen kontinuierlicher Prozessverbesserung und des innerbetrieblichen Vorschlagswesens möglich [205]. Hierzu rückt das Thema Data Science in den Vordergrund [206].

Das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS in der Montage ist anhand mehrerer Use Cases validiert und mittels einer Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf Einflüsse und Auswirkungen der resultierenden Ergebnisse durch Änderung von Eingangsparametern untersucht worden mit der Erkenntnis, dass sich das erwartete Ergebnis mit dem aus dem Einsatz des Vorgehensmodells resultierenden Ergebnis stimmig verhält. Auf diese Weise erfolgten eine systematische Untersuchung und Bewertung des Vorgehensmodells, jedoch keine empirische Evaluierung. Die empirische Evaluierung des entwickelten Vorgehensmodells verlangt weitere Forschungstätigkeiten. Eine der zentralen Herausforderungen ist dabei die Prüfung der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der DAS Komponenten in Bezug auf ein optimales Assistenzsystem im Hinblick auf empirische Aussagen und Erkenntnisse im Hinblick auf eine der Empirie gerechten Anzahl von Studienanalysen.

11 Literaturverzeichnis

- [1] E. Geisberger und M. Broy, Hrsg., agendaCPS, Bd. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [2] H. Kagermann und W. Wahlster, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Frankfurt am Main, 2013.
- [3] E. A. Lee und S. A. Seshia, Introduction to embedded systems: a cyber-physical systems approach, Second edition. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2017.
- [4] U. Dombrowski, T. Wagner, und C. Riechel, „Concept for a Cyber Physical Assembly System“, 2013, S. 293–296.
- [5] R. Müller, L. Hörauf, M. Vette, und C. Speicher, „Planning and Developing Cyber-physical Assembly Systems by Connecting Virtual and Real Worlds“, Procedia CIRP, Bd. 52, S. 35–40, 2016.
- [6] U. Dombrowski, C. Riechel, und M. Evers, „Die Rolle des Menschen in der 4. Industriellen Revolution“, in Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern, W. Kersten, H. Koller, und H. Lödding, Hrsg. Berlin: GITO mbH Verlag, 2014.
- [7] H. Hirsch-Kreinsen und M. ten Hompel, „Digitalisierung industrieller Arbeit: Entwicklungsperspektiven und Gestaltungsansätze“, in Handbuch Industrie 4.0 Bd.3, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. ten Hompel, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 357–376.
- [8] R. Bruder und M. Didier, „Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen“, in Handbuch Fahrerassistenzsysteme, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 633–645.
- [9] R. Spillner, Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion. München: Utz, Herbert, 2015.
- [10] M. Wiesbeck, Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. München: Utz, 2014.
- [11] P. Hold und W. Sihn, „Towards a model to identify the need and the economic efficiency of digital assistance systems in cyber-physical assembly systems“, 2016, S. 1–4.
- [12] Sarissa GmbH, „Produkte und Leistungen“, Produkte und Leistungen, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.sarissa.de/produkte-leistungen.html>. [Zugriffen: 05-Okt-2015].
- [13] S. Kesselmann und S. Willeke, „Technologie Koppendium - Interaktive Assistenzsysteme“. 2016.

- [14] A. Koppenburger, M. Garthaus, R. Simon, H. Remmers, und R. Weidner, „Selbstbestimmte Technologie und selbstbestimmte Anwendung“, in Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen, Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik Laboratorium Fertigungstechnik Forschernachwuchsgruppe smartASSIST, 2016, S. 69–78.
- [15] DIN EN ISO 6385:2004, „DIN EN ISO 6385:2004-05; Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2004); Deutsche Fassung EN ISO 6385:2004“. Beuth Verlag GmbH, Mai-2004.
- [16] B. Lotter und H.-P. Wiendahl, Hrsg., Montage in der industriellen Produktion: ein Handbuch für die Praxis ; mit 18 Tabellen, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [17] P. Kuhlang, B. Britzke, und MTM-Institut, Hrsg., Modellierung menschlicher Arbeit im Industrial Engineering: Grundlagen, Praxiserfahrungen und Perspektiven. Stuttgart: Ergonomia, 2015.
- [18] J. Deuse, K. Weisner, A. Hengstebeck, und F. Busch, „Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0“, in Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, A. Botthof und E. A. Hartmann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 99–109.
- [19] A. Hengstebeck, K. Weisner, M. Klöckner, J. Deuse, B. Kuhlenkötter, und J. Roßmann, „Formal Modelling of Manual Work Processes for the Application of Industrial Service Robotics“, Procedia CIRP, Bd. 41, S. 364–369, 2016.
- [20] J. Metternich, T. Meudt, und L. Hartmann, Leitfaden Industrie 4.0 trifft Lean - Wertschöpfung ganzheitlich steigern. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag, 2018.
- [21] G. Reinhart, Hrsg., Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser, 2017.
- [22] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 2870: Ganzheitliche Produktionssysteme Methodenkatalog, Blatt 2“. Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [23] C. M. Schlick, R. Bruder, und H. Luczak, Arbeitswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [24] A. Claeys, S. Hoedt, N. Soete, H. Van Landeghem, und J. Cottyn, „Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems“, IFAC-Pap., Bd. 48, Nr. 3, S. 924–929, 2015.
- [25] Å. Fast-Berglund, M. Åkerman, M. Karlsson, V. G. Hernández, und J. Stahre, „Cognitive Automation Strategies – Improving Use-efficiency of Carrier and Content of Information“, Procedia CIRP, Bd. 17, S. 67–70, 2014.
- [26] O. Korn, M. Funk, S. Abele, T. Hörz, und A. Schmidt, „Context-aware assistive systems at the workplace: analyzing the effects of projection and gamification“, 2014, S. 1–8.

- [27] G. Geiser, „Informationstechnische Arbeitsgestaltung“, in Handbuch Arbeitswissenschaft, Schäffer-Poeschel, 1997, S. 589–594.
- [28] U. Lindemann, Handbuch Produktentwicklung. 2016.
- [29] S. Hinrichsen, D. Riedinger, und A. Unrau, „Assistance Systems in Manual Assembly“, in Production Engineering and Management, Lemgo, 2016, S. 3–14.
- [30] E. Hollnagel, „Information and reasoning in intelligent decision support systems“, Int. J. Man-Mach. Stud., Bd. 27, Nr. 5–6, S. 665–678, Nov. 1987.
- [31] H. Krcmar, Informationsmanagement, 6., überarbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Gabler, 2015.
- [32] M. Lušić, C. Fischer, J. Bönig, R. Hornfeck, und J. Franke, „Worker Information Systems: State of the Art and Guideline for Selection under Consideration of Company Specific Boundary Conditions“, Procedia CIRP, Bd. 41, S. 1113–1118, 2016.
- [33] T. Jeske, „Entwicklung einer Methode zur Prognose der Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten“, Shaker, Aachen, 2013.
- [34] F. Loch, F. Quint, und I. Brishtel, „Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly“, 2016, S. 147–150.
- [35] T. Kosch, R. Kettner, M. Funk, und A. Schmidt, „Comparing Tactile, Auditory, and Visual Assembly Error-Feedback for Workers with Cognitive Impairments“, 2016, S. 53–60.
- [36] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, und S. Chatterjee, „A Design Science Research Methodology for Information Systems Research“, J. Manag. Inf. Syst., Bd. 24, Nr. 3, S. 45–77, Dez. 2007.
- [37] H. Takeda, P. Veerkamp, T. Tomiyama, und H. Yoshikawa, „Modeling Design Processes“, Am. Assoc. Artif. Intell., Bd. Volume 11, Nr. Number 4, S. 37–48, 1990.
- [38] A. R. Hevner und S. Chatterjee, Design research in information systems: theory and practice. New York ; London: Springer, 2010.
- [39] E. Westkämper, H.-J. Bullinger, P. Horváth, und E. Zahn, Montageplanung - effizient und marktgerecht. 2001.
- [40] J. P. Womack, D. T. Jones, und D. Roos, Die zweite Revolution in der Autoindustrie: Konsequenzen aus der weltweiten Studie des Massachusetts Institute of Technology, Ungekürzte Taschenbuchausg. München: Heyne, 1997.
- [41] P. Konold und H. Reger, Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung, 2., überarb. und erw. Aufl., Korrigierter Nachdr. Wiesbaden: Vieweg, 2009.

- [42] N. Svensson Harari, J. Bruch, und M. Jackson, „Mixed-Product Assembly Lines: Characteristics and Design Challenges“, gehalten auf der 6th Swedish Production Symposium, SPS14, Gothenburg, Sweden., 2015.
- [43] å. Fast-Berglund, T. Fässberg, F. Hellman, A. Davidsson, und J. Stahre, „Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly“, J. Manuf. Syst., Bd. 32, Nr. 3, S. 449–455, Juli 2013.
- [44] C. Franz, A. Koberstein, und L. Suhl, „Dynamic resequencing at mixed-model assembly lines“, Int. J. Prod. Res., Bd. 53, Nr. 11, S. 3433–3447, Juni 2015.
- [45] S. Erol, A. Jäger, P. Hold, K. Ott, und W. Sihn, „Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production“, Procedia CIRP, Bd. 54, S. 13–18, 2016.
- [46] D. Strang und Shaker Verlag GmbH, „Kommunikationsgesteuerte cyber-physische Montagemodelle“, 2016.
- [47] Bibliographisches Institut GmbH, „As-sis-tenz“, Wörterbuch, 14-Feb-2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Assistenz>. [Zugegriffen: 14-Feb-2019].
- [48] W. Gerke, Technische Assistenzsysteme: vom Industrieroboter zum Roboterassistenten. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015.
- [49] agiplan GmbH, Fraunhofer IML, und ZENIT GmbH, „Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie“, Berlin, 2015.
- [50] P. Hold, F. Ranz, W. Sihn, und V. Hummel, „Planning Operator Support in Cyber-Physical Assembly Systems“, IFAC-Pap., Bd. 49, Nr. 32, S. 60–65, 2016.
- [51] G. Schuh, S. Krumm, und W. Amann, Chefsache Komplexität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [52] S. Lang, Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion. Bamberg: Meisenbach, 2007.
- [53] B. Ludwig, Planbasierte Mensch-Maschine-Interaktion in multimodalen Assistenzsystemen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [54] „Visuelle Assistenz und Prüfsysteme - Fraunhofer IFF“, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/messtechnik-prueftechnik/visuelle-assistenz.html>. [Zugegriffen: 04-Jän-2018].
- [55] A. Bannat, Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion. 2014.

- [56] „Digitale Assistenzsysteme | evolaris“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.evolaris.net/de/forschung/forschungsschwerpunkte/digitale-assistenzsysteme/>. [Zugegriffen: 12-Feb-2018].
- [57] P. Hold, S. Erol, G. Reisinger, und W. Sihm, „Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems“, *Procedia Manuf.*, Bd. 9, S. 143–150, 2017.
- [58] O. Strohm und O. P. Escher, Hrsg., *Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten: ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation*. Zürich: vdf, Hochschulverl. an der ETH Zürich, 1997.
- [59] E. A. Hartmann, *Arbeitssysteme und Arbeitsprozesse*. Zürich: vdf, Hochschulverl. an der ETH, 2005.
- [60] E. Ulrich, „Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme - eine Erinnerung“, 6 (1), 2013.
- [61] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), „Zukunft der Arbeit - Innovationen für die Arbeit von morgen“, Bonn, 2016.
- [62] M. Zölch, W. G. Weber, und L. Leder, Hrsg., *Praxis und Gestaltung kooperativer Arbeit*. Zürich: vdf, Hochschulverl. an der ETH Zürich, 1999.
- [63] J. Deuse, „Prospektive Ermittlung von Montagearbeitsinhalten in der Digitalen Fabrik (ProMondi): gemeinsamer Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben: ProMondi im Rahmenkonzept ‚Forschung für die Produktion von Morgen‘“, Institut für Produktionssysteme, 2015.
- [64] G. Reisinger, T. Komenda, P. Hold, und W. Sihm, „A Concept towards Automated Data-Driven Reconfiguration of Digital Assistance Systems“, *Procedia Manuf.*, Bd. 23, S. 99–104, 2018.
- [65] I. Goodfellow, Y. Bengio, und A. Courville, *Deep Learning: das umfassende Handbuch: Grundlagen, aktuelle Verfahren und Algorithmen, neue Forschungsansätze*, 1. Auflage. Frechen: mitp, 2018.
- [66] A. Mittelman, M. Della Schiava, und Books on Demand GmbH (Norderstedt), *Wissensmanagement wird digital*. 2019.
- [67] R. Bruns und J. Dunkel, „Complex Event Processing im Überblick“, in *Complex Event Processing*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 9–17.
- [68] M. Speicher, K. Tenhaft, S. Heinen, und H. Handorf, „Enabling Industry 4.0 with holobuilder“, in *INFORMATIK 2015*, W. Douglas, Hrsg. 2015.
- [69] R. Senderek und K. Geisler, „Assistenzsysteme zur Lernunterstützung in der Industrie 4.0“, 2015, S. 36–46.
- [70] M. Funk, L. Lischke, S. Mayer, A. S. Shirazi, und A. Schmidt, „Teach Me How! Interactive Assembly Instructions Using Demonstration and In-Situ Projection“,

- in Assistive Augmentation, J. Huber, R. Shilkrot, P. Maes, und S. Nanayakkara, Hrsg. Singapore: Springer Singapore, 2018, S. 49–73.
- [71] J. P. Zachman, „The Zachman Framework Evaluation“, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.zachman.com/ea-articles-refernces/54-the-zachman-framework-evaluation>. [Zugegriffen: 30-Dez-2018].
- [72] D. Matthes, Enterprise-Architecture-Frameworks-Kompendium: über 50 Rahmenwerke für das IT-Management. Berlin Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2011.
- [73] K. Bengler, H. Bubb, I. Totzke, J. Schumann, und F. Flemisch, „Automotive“, in Information Ergonomics, M. Stein und P. Sandl, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 99–134.
- [74] P. Hold, F. Ranz, H. Vera, und W. Sihm, „Durchblick im Variantendschungel - Visuelle Assistenzsysteme als Felxibilitätshebel auf dem Dhop Floor“, Bd. WINGbusiness, Nr. 48, Feb-2015.
- [75] F. Ansari, P. Hold, und W. Sihm, „Human-Centered Cyber Physical Production System: How Does Industry 4.0 Impact on Decision-Making Tasks?“, gehalten auf der IEEE Technology and Engineering Management Society Conference, USA, IL, Chicago, 2018.
- [76] C. S. French, Oliver and Chapman’s data processing and information technology. London: Thomson, 1996.
- [77] R. Heidel, M. Hoffmeister, M. Hankel, und U. Döbrich, Industrie4.0 Basiswissen RAMI4.0: Referenzarchitekturmodell mit Industrie4.0-Komponente, 1. Auflage. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [78] P. Hold, F. Ranz, und W. Sihm, „Konzeption eines MTM-basierten Bewertungsmodells für digitalen Assistenzbedarf in der cyber-physischen Montage“, in Megatrend Digitalisierung: Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation, Berlin: GITO mbH Verlag, 2016.
- [79] H.-J. Bullinger, D. Ammer, und REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation, Hrsg., Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis. München: Hanser, 1986.
- [80] M. F. Zaeh und M. Wiesbeck, „A Model for Adaptively Generating Assembly Instructions Using State-based Graphs“, in Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, M. Mitsubishi, K. Ueda, und F. Kimura, Hrsg. London: Springer London, 2008, S. 195–198.
- [81] A. G. Abad, K. Paynabar, und J. J. Jin, „Modeling and Analysis of Operator Effects on Process Quality and Throughput in Mixed Model Assembly Systems“, J. Manuf. Sci. Eng., Bd. 133, Nr. 2, S. 021016, 2011.

- [82] L. Merkel, J. Weth, R. Sochor, C. Berger, S. Braunreuther, und G. Reinhart, „A Modular Framework for Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly“, in Proceedings: Knowledge Valorisation in the Age of Digitalization, 2019, S. 346–351.
- [83] S. Schlund, W. Mayrhofer, und C. Clemenz, „Assistenzsysteme in der Produktion 1: Überblick über Assistenzsysteme in der Produktion“, Wien, 2018.
- [84] J. Klapper, E. Gelec, B. Pokorni, M. Hämmerle, und R. Rothenberger, „Potenziale digitaler Assistenzsysteme - aktueller und zukünftiger Einsatz digitaler Assistenzsysteme in produzierenden Unternehmen“, Fraunhofer IAO, 2019.
- [85] T. Nebl, Produktivitätsmanagement: theoretische Grundlagen, methodische Instrumentarien, Analyseergebnisse und Praxiserfahrungen zur Produktivitätssteigerung in produzierenden Unternehmen. München: Hanser, 2002.
- [86] R. Bokranz und K. Landau, Handbuch Industrial Engineering:: Produktivitätsmanagement mit MTM. Bd. 2: Anwendung, 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2012.
- [87] C. Schlick, R. Bruder, und H. Luczak, Arbeitswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [88] H. B. Maynard und K. B. Zandin, Hrsg., Maynard's industrial engineering handbook, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [89] webfader, „MTM - Methods-Time Measurement“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dmtm.com/institut/methodentools/mtmmethode/?inlink=1>. [Zugegriffen: 04-Jän-2018].
- [90] M. Manns, R. Wallis, und J. Deuse, „Automatic Proposal of Assembly Work Plans with a Controlled Natural Language“, Procedia CIRP, Bd. 33, S. 345–350, 2015.
- [91] Deutsche MTM-Vereinigung e. V., „Keine Angst vor Industrie 4.0. Ein Interview mit Prof. Volker Stich, Geschäftsführer FIR e. V. an der RWTH Aachen“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dmtm.com/newsmedien/newsausgabedetails/details/show/keine-angst-vor-industrie-40/>. [Zugegriffen: 05-März-2019].
- [92] P. Kuhlmann, „Positionen der Deutschen MTM-Vereinigung e. V. zu Assistenzsystemen und zur Verarbeitung von digitalen Bewegungsdaten“, Deutsche MTM-Vereinigung e.V., MTM-Institut, 12, 2019.
- [93] A. Lolling, „Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertätigkeiten“, Shaker, Aachen, 2003.
- [94] D. Adam, Produktions-Management. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1993.
- [95] M. Schulte-Zurhausen, Organisation, 6., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Vahlen, 2014.

- [96] S. Koch, Einführung in das Management von Geschäftsprozessen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [97] M. Schenk, J. Grubert, D. Berndt, und R. Mecke, „Augmented Reality basierte Werkerassistenz“, in Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation, M. Schenk, Hrsg. GITO mbH Verlag, 2009, S. 341–360.
- [98] M. Schenk, R. Mecke, J. Grubert, D. Berndt, und S. Sauer, „Augmented Reality: Ein neuer Ansatz für Assistenzsysteme in der Produktion.“, Ind.-Manag., Bd. 26, Nr. 2, 2010.
- [99] R. T. Azuma, „A Survey of Augmented Reality“, Presence Teleoperators Virtual Environ., Bd. 6, Nr. 4, S. 355–385, Aug. 1997.
- [100] S. Nölle, „Augmented Reality als Vergleichswerkzeug am Beispiel der Automobilindustrie“, Technische Universität München, 2006.
- [101] A. Y. C. Nee, S. K. Ong, G. Chryssolouris, und D. Mourtzis, „Augmented reality applications in design and manufacturing“, CIRP Ann., Bd. 61, Nr. 2, S. 657–679, 2012.
- [102] W. Eversheim, M. Weck, D. Jahn, M. Koschig, und I. Fricker, „Augmented Reality-Technology unterstützt manuelle Montage. Einzel- und Einserienfertigung effizienter gestalten“, 143/9, 2001.
- [103] R. Reif, „Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems“, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (fml), Techn. Univ. München, Garching b. München, 2009.
- [104] M. Lušić, C. Fischer, J. Bönig, R. Hornfeck, und J. Franke, „Worker Information Systems: State of the Art and Guideline for Selection under Consideration of Company Specific Boundary Conditions“, Procedia CIRP, Bd. 41, S. 1113–1118, 2016.
- [105] T. Hillenbrand, „Vor dem Internet kam der Dungeon“, Okt-2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/tp/features/Vor-dem-Internet-kam-der-Dungeon-3362070.html>. [Zugegriffen: 02-Jän-2019].
- [106] J. Kalaimani, „Introduction to SAP Enterprise Software“, in SAP Project Management Pitfalls, Berkeley, CA: Apress, 2016, S. 1–23.
- [107] N. Armbruster und H. Vogler, „Leitlinien für eine sichere und wirtschaftliche Produktion“. Armbruster Engineering GmbH & Co. KG, 2019.
- [108] S. Himstedt, „Variantenreiche Montage mit SAP MES - SAP ME in einem Anwendungsbeispiel“, 17-Apr-2014.
- [109] E. Teniente und M. Weidlich, Hrsg., Business Process Management Workshops: BPM 2017 International Workshops, Barcelona, Spain, September 10–11, 2017, Revised Papers, Bd. 308. Cham: Springer International Publishing, 2018.

- [110] teXXmo Mobile Solution GmbH & Co. KG, „Push the button! And...“, Push the button! And..., 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://www.iot-button.eu/index_en.html. [Zugegriffen: 03-Jän-2019].
- [111] D. W. Engel, A. C. Dalton, K. K. Anderson, C. Sivaramakrishnan, und C. Lansing, „Development of Technology Readiness Level (TRL) Metrics and Risk Measures“, PNNL-21737, 1067968, Okt. 2012.
- [112] C. Matysczok, S. Parisi, P. Ebbesmeyer, und H. Krumm, „Mobile Representation of Complex Assembly Processes in Automotive Industry“, in Volume 1: 23rd Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B, Chicago, Illinois, USA, 2003, Bd. 2003, S. 109–113.
- [113] M. Lušić, K. Schmutzer Braz, S. Wittmann, C. Fischer, R. Hornfeck, und J. Franke, „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“, Adv. Mater. Res., Bd. 1018, S. 23–30, Sep. 2014.
- [114] M. Grafe, C. Matysczok, P. Ebbesmeyer, und H. Krumm, „Visualization of Complex Automotive Assembly Sequences on Mobile Devices“, in Proceedings of the 1st International Forum on Applied Wearable Computing, Bremen, 2004.
- [115] J. Brooke, „SUS: a ‚quick and dirty‘ usability scale“, in Usability Evaluation in Industry, Taylor and Francis, 1996.
- [116] L. Zeltzer, V. Limère, E.-H. Aghezzaf, und H. Landeghem, „Measuring the objective complexity of assembly workstation“, in The Seventh International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology, Proceedings, Venice, Italy, 2012, S. 341–346.
- [117] L. Zeltzer, E.-H. Aghezzaf, und V. Limère, „Workload balancing and manufacturing complexity levelling in mixed-model assembly lines“, Int. J. Prod. Res., Bd. 55, Nr. 10, S. 2829–2844, Mai 2017.
- [118] G. Kaminski und U. Neisser, „Dosch Psychologisches Wörterbuch, online Lexikon für Psychologie und Pädagogik“, 1994. [Online]. Verfügbar unter: <http://lexikon.stangl.eu/240/kognition/>.
- [119] H. Wagenknecht, Lexikon der Psychologie. Freiburg: Verlag Herder KG, 1980.
- [120] R. H. Kluwe, „100 Jahre Psychologie: Allgemeine Psychologie“, in Reflexionen der Psychologie. 100 Jahre Deutsche Gesellschaft für Psychologie, Göttingen: Hogrefe, 2005, S. 16–22.
- [121] C. E. van Kraayenoord, „The role of metacognition in reading comprehension“, in Focal points of the research and development of pedagogically-psychological perspectives, H. P. Trollenier, W. Lenhard, und P. Marx, Hrsg. S. 277–302.

- [122] V. Jahn, „Lernen mit Multimedia: Die Spezifizierung des Modalitätsprinzips unter Berücksichtigung individueller und gestaltungsdidaktischer Faktoren“, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2011.
- [123] S. N. Samy und H. ElMaraghy, „A model for measuring products assembly complexity“, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, Bd. 23, Nr. 11, S. 1015–1027, Nov. 2010.
- [124] X. Zhu, S. J. Hu, Y. Koren, und S. P. Marin, „Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines“, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Bd. 130, Nr. 5, S. 051013, 2008.
- [125] K. Feldmann, Hrsg., *Montage strategisch ausrichten: Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen*. Berlin: Springer, 2004.
- [126] I. Kucukkoc und D. Z. Zhang, „Balancing of mixed-model parallel U-shaped assembly lines considering model sequences“, *Int. J. Prod. Res.*, Bd. 55, Nr. 20, S. 5958–5975, 2017.
- [127] D. Drascic und P. Milgram, „Perceptual issues in augmented reality“, gehalten auf der *Electronic Imaging: Science & Technology*, San Jose, CA, 1996, S. 123–134.
- [128] M. Brill, *Virtuelle Realität*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [129] P. Hořejší, „Augmented Reality System for Virtual Training of Parts Assembly“, *Procedia Eng.*, Bd. 100, S. 699–706, 2015.
- [130] A. Marcus, Hrsg., *Design, User Experience, and Usability: Design Discourse*, Bd. 9186. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [131] DIN, „DIN EN ISO 9241-11 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO/DIS 9241-11.2:2016), Normentwurf - zurückgezogen“. Beuth Verlag, 2016.
- [132] International Ergonomics Association, „Definition and Domains of Ergonomics“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.cc/whats/>. [Zugegriffen: 17-Dez-2018].
- [133] W. Rohmert und K. Martin, „Arbeitswissenschaftliche Begleitforschung für das Projekt AEG“, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, Karlsruhe, 1984.
- [134] H. Meffert, C. Burmann, und M. Kirchgeorg, *Marketing: Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung ; Konzepte - Instrumente - Praxisbeispiele*, 12., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- [135] A. M. Kuhlmann und W. Sauter, *Innovative Lernsysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

- [136] G. Richter, Toolbox Version 1.2: Instrumente zur Erfassung psychischer Belastungen ; Forschung Projekt F 1965, 2., unveränd. Aufl. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2011.
- [137] C. Kern und R. Refflinghaus, „Assembly-specific database for predicting human reliability in assembly operations“, *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, Bd. 26, Nr. 9–10, S. 1056–1070, Okt. 2015.
- [138] B. H. Kantowitz und J. L. Campell, „Pilot Workload and Flightdeck Automation“, in *Automation and Human Performance: Theory and Applications*, R. Parasuraman und M. Mouloua, Hrsg. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 1996.
- [139] A. Dillon, „User acceptance of information technology“, in *Encyclopedia of human factors and ergonomics*, W. Karwowski, Hrsg. London: Taylor and Francis, 2001.
- [140] G. Wiendieck, „Akzeptanz“, in *Enzyklopädie der Betriebswirtschaft: Bd. 2 Handwörterbuch der Organisation.*, E. Friese, Hrsg. Stuttgart: Poeschel, 1992, S. 89–98.
- [141] K. Vogelsang, M. Steinhüser, und U. Hoppe, „Theorieentwicklung in der Akzeptanzforschung: Entwicklung eines Modells auf Basis einer qualitativen Studie“, in *Proceedings*, 2013, S. 1425–1439.
- [142] E. Ammenwerth u. a., „Einflussfaktoren auf die Akzeptanz und Adoption eines Pflegedokumentationssystems“. Private Universität für Medizinische Informatik und Technik Tirol, 2004.
- [143] V. Venkatesh und F. D. Davis, „A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies“, *Manag. Sci.*, Bd. 46, Nr. 2, S. 186–204, Feb. 2000.
- [144] Venkatesh, Morris, Davis, und Davis, „User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View“, *MIS Q.*, Bd. 27, Nr. 3, S. 425, 2003.
- [145] D. L. Goodhue und R. L. Thompson, „Task-Technology Fit and Individual Performance“, *MIS Q.*, Bd. 19, Nr. 2, S. 213, Juni 1995.
- [146] A. Ullrich, G. Vladova, C. Thim, und N. Gronau, „Akzeptanz und Wandlungsfähigkeit im Zeichen der Industrie 4.0“, *HMD Prax. Wirtsch.*, Bd. 52, Nr. 5, S. 769–789, Okt. 2015.
- [147] L. Gardenswartz und A. Rowe, *Diverse teams at work: capitalizing on the power of diversity*. Alexandria, Va: Society for Human Resource Management, 2003.
- [148] W. Apt, M. Bovenschulte, K. Priesack, C. Weiß, und E. A. Hartmann, „Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb“, Institut für Innovation und Technik, im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Arbeit und Soziales, Expertise Forschungsbericht 502, 2018.

- [149] M. Kuniavsky, *Observing the user experience: a practitioner's guide to user research*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- [150] D. J. Mayhew, *The usability engineering lifecycle: a practitioner's handbook for user interface design*. San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- [151] H. Bubb, Hrsg., *Menschliche Zuverlässigkeit: Definitionen, Zusammenhänge, Bewertung*, 1. Aufl. Landsberg: Ecomed, 1992.
- [152] REFA - Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, „Lehrunterlagen Grundschein Arbeitsorganisation - Prozess- und Zeitdatenermittlung - Analyse und Synthese“, Darmstadt, 2001.
- [153] B. Lotter, J. Deuse, und E. Lotter, *Die Primäre Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [154] REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation, Hrsg., *Datenermittlung*. München: Hanser, 1997.
- [155] K. Kovacs, F. Ansari, C. Geisert, E. Uhlmann, R. Glawar, und W. Sihm, „A Process Model for Enhancing Digital Assistance in Knowledge-Based Maintenance“, in *Machine Learning for Cyber Physical Systems*, Bd. 9, J. Beyerer, C. Kühnert, und O. Niggemann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 87–96.
- [156] M. de Greiff, *Die Prognose von Lernkurven in der manuellen Montage unter besonderer Berücksichtigung der Lernkurven von Grundbewegungen*, Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl, 2001.
- [157] R. Frigg und C. Werndl, „Entropy: A Guide for the Perplexed“, in *Probabilities in Physics*, C. Beisbart und S. Hartmann, Hrsg. Oxford: Oxford University Press, 2001, S. 115–142.
- [158] W. L. Hieber, *Lern- und Erfahrungskurveneffekte und ihre Bestimmung in der flexibel automatisierten Produktion*. München: F. Vahlen, 1991.
- [159] G. Ullrich, „Wirtschaftliches Anlernen in der Serienmontage - Ein Beitrag zur Lernkurventheorie“, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Duisburg, 1995.
- [160] A. Laarmann, *Lerneffekte in der Produktion*, 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl, 2005.
- [161] E. A. Fleishman, „The description and prediction of perceptual motor skill learning“, in *Training Research and Education*, R. Glaser, Hrsg. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1962, S. 137–175.
- [162] E. A. Fleishman und G. D. Ellison, „A Factor Analysis of Fine Manipulative Performance“, in *Journal of Applied Psychology*, 1962, Bd. 46, S. 96–105.

- [163] W. Hamster, „Die Motorische Leistungsserie - MLS - Handanweisung - Dr. G. Schuhfried“. 1980.
- [164] H. Lödding und A. Friedwald, „Produktivität - Eine Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Wirtschaft“, in Forschungsschwerpunkt Maritime System, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2014, S. 54–59.
- [165] S. Egger-Lampl, C. Gerdenitsch, L. Deinhard, R. Schatz, und P. Hold, „Assembly Instructions with AR: Towards Measuring Interactive Assistance Experience in an Industry 4.0 Context“, gehalten auf der 11th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX 2019), 2019.
- [166] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI-Richtlinie 4006: Menschliche Zuverlässigkeit - Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung - Blatt 1“. Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [167] D. Duran und N. Lewandowski, „Untersuchung der kognitiven Beanspruchung durch Sprachassistenzsysteme“. 2018.
- [168] H.-A. Crostack und J. Deuse, „Optimierung von Kommissionierung und Verpackung durch geeignete Strategien für die Qualitätsprüfung unter Berücksichtigung der Retourenabwicklung. Endbericht zum Forschungsprojekt QUINKOM - Optimierung der Qualität in Kommissionierung und Verpackung“. RIF, 2007.
- [169] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI-Richtlinie 4006: Menschliche Zuverlässigkeit - Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung - Blatt 2“. Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [170] H. Schindele, „Planung qualitätsförderlicher Personalstrukturen im Fertigungsbereich“, Universität Karlsruhe, ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation, Karlsruhe, 1996.
- [171] B. Zimolong, „Fehler und Zuverlässigkeit“, in Ingenieurspsychologie. Enzyklopädie der Psychologie., C. Hoyos und B. Zimolong, Hrsg. Göttingen: Hogrefe, 1990.
- [172] A. D. Swain und H. E. Guttman, „Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Final report“, NUREG/CR-1278, SAND-80-0200, 5752058, Aug. 1983.
- [173] K. Brauser, „ESAT - ein neues verfahren zur Abschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit“, in Menschliche Zuverlässigkeit, K. P. Gärtner, Hrsg. 1992.
- [174] K. Brauser, Aufgabentaxonomie: ein Verfahren zur Ermittlung der menschlichen Leistung bei der Durchführung von Aufgaben. MBB, 1990.
- [175] S. Klipper, Information Security Risk Management. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.

- [176] C. Kern und R. Refflinghaus, „Modification of the HRA-method ESAT for improving human reliability in manual assembly“, in *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*, Glasgow, Scotland: CRC Press, 2016.
- [177] C. Kern und R. Refflinghaus, „Cross-disciplinary method for predicting and reducing human error probabilities in manual assembly operations“, *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, Bd. 24, Nr. 7–8, S. 847–858, Aug. 2013.
- [178] C. Kern und R. Refflinghaus, „Expert System for Evaluating Human Reliability in Manual Assembly Operations“, in *Excellence in Services*, Italy (Palermo), 2015, S. 261–276.
- [179] Bosch Rexroth, „Funk-Akkuschrauber“, Funk-Akkuschrauber, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.boschrexroth.com/ics/cat/?language=de&cat=Tightening-System-Catalog&p=g306482>. [Zugegriffen: 06-Sep-2019].
- [180] K. Poggensee, *Investitionsrechnung: Grundlagen - Aufgaben - Lösungen*, 3., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- [181] A. G. Coenenberg, T. M. Fischer, und T. Günther, *Kostenrechnung und Kostenanalyse.*, 6., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2007.
- [182] S. Günther, *Design for Six Sigma: Konzeption und Operationalisierung von alternativen Problemlösungszyklen auf Basis evolutionärer Algorithmen*, 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2010.
- [183] H.-J. Zimmermann, *Operations Research: Methoden und Modelle ; für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker*, 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2008.
- [184] H. Rogers, *Theory of recursive functions and effective computability*, 1st MIT Press pbk. ed. Cambridge, Mass: MIT Press, 1987.
- [185] G. Gigerenzer und P. M. Todd, *Simple heuristics that make us smart*, 1. issued as an Oxford Univ. Press paperback. Oxford: Oxford Univ. Press, 2001.
- [186] G. Dueck und T. Scheuer, „Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing“, *J. Comput. Phys.*, Bd. 90, Nr. 1, S. 161–175, Sep. 1990.
- [187] A. Scollen und T. Hargraves, *Simulated annealing: introduction, applications and theory*. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, Inc, 2018.
- [188] F.-S. Wang und L.-H. Chen, „Tabu Search“, in *Encyclopedia of Systems Biology*, W. Dubitzky, O. Wolkenhauer, K.-H. Cho, und H. Yokota, Hrsg. New York, NY: Springer New York, 2013, S. 2120–2120.
- [189] F. Weinberg, *Branch and Bound: Eine Einführung Unterlagen für einen Kurs des Instituts für Operations Research der ETH Zürich*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1973.

- [190] K. Weicker, Evolutionäre Algorithmen, 3., überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [191] S. Koch, G. Wäscher, und G. Wäscher, Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem in manuellen Kommissioniersystemen. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [192] F. Streichert und H. Ulmer, „JavaEvA A Java based framework for Evolutionary Algorithms - Manual and Documentation -“, Centre for Bioinformatics Tübingen (ZBIT) of the Eberhard-Karls-University Tübingen, Wilhelm-Schickard-Institut, Technischer Report WSI-2005-06, 2005.
- [193] K. Beumelburg, „Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation“, Jost-Jetter, Heimsheim, 2005.
- [194] T. Jansen, Analyzing evolutionary algorithms: the computer science perspective. Berlin ; New York: Springer, 2013.
- [195] G. Raidl, „Evolutionäre Algorithmen. Skriptum zur Vorlesung Evolutionäre Algorithmen“, Technische Universität Wien, Institut für Computergrafik und Algorithmen, 1996.
- [196] K. Ehrlenspiel, Integrierte Produktentwicklung Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München [u.a.: Hanser, 2009.
- [197] D. D. Frey und C. L. Dym, „Validation of design methods: lessons from medicine“, Res. Eng. Des., Bd. 17, Nr. 1, S. 45–57, Juni 2006.
- [198] „OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.optiv.de/impresum.htm>. [Zugegriffen: 10-Aug-2018].
- [199] C. Homburg, Quantitative Betriebswirtschaftslehre: Entscheidungsunterstützung durch Modelle ; mit Beispielen, Übungsaufgaben und Lösungen, 3., überarb. Aufl., [Nachdr.]. Wiesbaden: Gabler, 2013.
- [200] M. Bruhn und H. Meffert, Handbuch Dienstleistungsmarketing: Planung - Umsetzung - Kontrolle. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012.
- [201] Microsoft Excel 2016, Tabellenkalkulation, kostenlos testen“. [Online]. Verfügbar unter: <https://products.office.com/de-at/excel>. [Zugegriffen: 12-Aug-2018].
- [202] „Erkennen und Lösen eines Problems mithilfe von Solver“. [Online]. Verfügbar unter: <https://support.office.com/de-de/article/erkennen-und-l%C3%B6sen-eines-problems-mithilfe-von-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. [Zugegriffen: 12-Aug-2018].
- [203] R. Bokranz, K. Landau, und C. Becks, Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2006.

- [204] G. Reginato, M. J. Anzanello, A. Kahmann, und L. Schmidt, „Mixed assembly line balancing method in scenarios with different mix of products“, *Gest. Produção*, Bd. 23, Nr. 2, S. 294–307, Juni 2016.
- [205] H.-D. Schat, *Erfolgreiches Ideenmanagement in der Praxis: betriebliches Vorschlagswesen und kontinuierlichen Verbesserungsprozess implementieren, reaktivieren und stetig optimieren*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2017.
- [206] International Data Science Conference, *Data science - analytics and applications: proceedings of the 1st International Data Science Conference - iDSC 2017*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [207] M. K. Comer, D. A. Seaver, W. G. Stillwell, und C. D. Gaddy, „Generating Human Reliability Estimates Using Expert Judgment“, Sandia National Laboratories, Washington, D.C, Main Report 1, 1984.
- [208] D. E. Embrey und B. Kirwan, „A Comparative Evaluation of Three Subjects Human Reliability Technique“, in *The Annual Ergonomics Society Conference Proceedings*, K. Coombes, Hrsg. London: Taylor and Francis, 1983, S. 137–142.
- [209] J. C. Williams, „A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational experience“, in *Proceedings of IEEE 4th Conference of Human Factors*, Monterey, 1988.
- [210] A. I. Siegel, W. D. Bartter, J. J. Wolf, H. E. Knee, und P. M. Haas, „Maintenance Personnel Performance Simulation (MAPPS) Model: Summary Description“, USA, Technical Report NUREG/CR-3626, Volume 1, ORNL/TM-9041/V1, 1984.
- [211] G. C. Bello und V. Colombari, „The human factors in risk analyses of process plants: The control room operator model ‘TESEO‘“, *Reliab. Eng.*, Bd. 1, Nr. 1, S. 3–14, Juli 1980.
- [212] G. W. Hannaman, A. J. Spurgin, und Y. Lukic, „A model for assessing human cognitive reliability in PRA studies“, in *Proceedings of IEEE 3rd Conference on Human Factors and Nuclear Safety*, Monterey, CA (USA), 1985, S. 343–353.
- [213] R. Hall, J. Fragola, und J. Wreathall, „Post-event human decision errors: operator action tree/time reliability correlation“, NUREG/CR-3010, BNL-NUREG-51601, 6460666, Nov. 1982.
- [214] A. B. Pritsker, D. B. Wortman, C. Sfum, G. P. Chubb, und D. J. Seifert, „Systems Analysis of an Integrated Network of Tasks“. National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, 1974.
- [215] G. W. Hannaman und A. J. Spurgin, „Systematic Human Action Reliability Procedure (SHARP)“, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (United States), San Diego, CA (United States), Technical Report Volume 36, 13, 1984.

12 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: BEISPIEL EINES MODERNEN DAS	3
ABBILDUNG 2: PRODUKTIONSGESTALTUNGSPARADIGMEN DES LETZTEN 100 JAHRE	4
ABBILDUNG 3: DESIGN SCIENCE RESEARCH METHODOLOGY PROCESS MODEL	8
ABBILDUNG 4: STRUKTUR UND DEN AUFBAU DIESER ARBEIT	10
ABBILDUNG 5: CYBER-PHYSISCHES MONTAGESYSTEM DER TU WIEN PILOTFABRIK INDUSTRIE 4.0.....	13
ABBILDUNG 6: VERÄNDERUNGEN DES ARBEITSSYSTEMS DURCH CPMS	14
ABBILDUNG 7: VERÄNDERTE BEANSPRUCHUNGEN DES WERKERS DURCH CPMS	15
ABBILDUNG 8: BEZUGSRAHMEN (1 – 8) DER ARBEIT.....	18
ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHEN DARSTELLUNG DES AUFBAUS DAS	23
ABBILDUNG 10: REGELWERK ZUR BESTIMMUNG VON DIGITALEM (KOGNITIVEM) UNTERSTÜTZUNGSBEDARF	30
ABBILDUNG 11: WERKEREINFLUSS AUF PROZESSQUALITÄT UND DURCHSATZ	31
ABBILDUNG 12: MORPHOLOGIE FÜR ASSISTENZSYSTEME	32
ABBILDUNG 13: BEACHTUNG DES MTO-KONZEPTS IN DER VORLIEGENDEN ARBEIT	45
ABBILDUNG 14: STRUKTURELLER AUFBAU DES KAPITELS 5	47
ABBILDUNG 15: EINORDNUNG MORPHOLOGIE, TECHNOLOGIE-POOLS UND BESCHREIBUNGSPARAMETER DAS	47
ABBILDUNG 16: ZUORDNUNG VON TECHNOLOGIE-POOLS DAS ENTLANG DER MORPHOLOGIE DAS	52
ABBILDUNG 17: EINORDNUNG FORMULIERUNG BESCHREIBUNGSPARAMETER DAS AUF BASIS DER METHODE MTM	58
ABBILDUNG 18: KOMPLEXITÄTSTREIBER EINES ARBEITSPLATZES	62
ABBILDUNG 19: EINORDNUNG REGELWERK (TECHNIK – MENSCH)	73
ABBILDUNG 20: ZUORDNUNG KOMPONENTEN DAS AUF BASIS VON MTM.....	76
ABBILDUNG 21: STRUKTURELLER AUFBAU DES KAPITELS 6	77
ABBILDUNG 22: EINORDNUNG BESCHREIBUNGSPARAMETER DER MENSCHEN	78

ABBILDUNG 23: MERKMALE DES MENSCHEN UND BESTIMMUNGSGRÖßEN MENSCHLICHER ARBEIT	79
ABBILDUNG 24: ZUSAMMENSETZUNG DES MENSCHLICHEN LEISTUNGSANGEBOTS	80
ABBILDUNG 25: BELASTUNGS-/ BEANSPRUCHUNGSKONZEPT	82
ABBILDUNG 26: EINORDNUNG DER FORMULIERUNG DER BESCHREIBUNGSPARAMETER DES MENSCHEN	83
ABBILDUNG 27: EINORDNUNG EINFLÜSSE UND REGELWERK (MENSCH – ORGANISATION) ..	85
ABBILDUNG 28: STRUKTURELLER AUFBAU DES KAPITELS 7	91
ABBILDUNG 29: STRUKTURELLER AUFBAU DES KAPITELS 7.1	92
ABBILDUNG 30: STRUKTURELLER AUFBAU DES KAPITELS 7.2	101
ABBILDUNG 31: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ANLERNZEIT	102
ABBILDUNG 32: DARSTELLUNG EINER LERNKURVE SOWIE DER ZU BESTIMMENDEN MODELLPARAMETER	104
ABBILDUNG 33: STRUKTURELLER AUFBAU DES KAPITELS 7.3	111
ABBILDUNG 34: VORGEHENSWEISE DES VERFAHRENS ESAT [173]	115
ABBILDUNG 35: KLASSIFIZIERUNG DER AUFGABEN NACH DER ZUVERLÄSSIGKEIT	120
ABBILDUNG 36: DARSTELLUNG EINES SCHEMATISCHEN HRA-EREIGNISBAUMS	121
ABBILDUNG 37: ERGEBNISSE VON KAPITEL 7.....	129
ABBILDUNG 38: STRUKTURELLER AUFBAU VON KAPITEL 8.....	131
ABBILDUNG 39: STRUKTURELLER AUFBAU VON KAPITEL 8.1	131
ABBILDUNG 40: FÜNF SCHRITTE DES VORGEHENSMODELLS ZUR PLANUNG UND EVALUIERUNG DAS	136
ABBILDUNG 41: STRUKTURELLER AUFBAU VON KAPITEL 8.2.....	136
ABBILDUNG 42: 1. SCHRITT – BESTIMMUNG DER AUSGANGSSITUATION	137
ABBILDUNG 43: 2. SCHRITT – QUANTIFIZIERUNG DER BESCHREIBUNGSPARAMETER	138
ABBILDUNG 44: 3. SCHRITT – VOR-PRIORISIERUNG	140
ABBILDUNG 45: 4. SCHRITT – WIRTSCHAFTLICHKEITSBEWERTUNG	140
ABBILDUNG 46: 5. SCHRITT - IDENTIFIKATION DER BETRIEBSWIRTSCHAFTLICH VORTEILHAFTESTEN DAS KOMPONENTEN	146

ABBILDUNG 47: FORMULIERUNG DES EVOLUTIONÄREN BEZIEHUNGSWEISE DES GENETISCHEN ALGORITHMUS.....	152
ABBILDUNG 48: DARSTELLUNG DER VORGEHENSCHRITTE DER ENTWICKELTEN VORGEHENSWEISE	158
ABBILDUNG 49: INTEGRATIONSMÖGLICHKEITEN DES VORGEHENSMODELLS IN PHASEN DER MONTAGEPLANUNG	159
ABBILDUNG 50: AUSZÜGE EINER BIBLIOMETRIEANALYSE ZU DAS.....	225
ABBILDUNG 51: VORGEHENSMODELLE ZUR PLANUNG UND EVALUIERUNG VON MONTAGESYSTEMEN	226
ABBILDUNG 52: MORPHOLOGIE DAS	227
ABBILDUNG 53: KOMPLEXITÄTSTREIBER UND DEREN SKALIERUNG	228
ABBILDUNG 54: ANALYSE DER NUTZUNG DES BETRIEBSMITTELS UND EINTEILUNG IN ABLAUFARTEN	232
ABBILDUNG 55: GLIEDERUNG VON ZEITARTEN UND ZUORDNUNG ZU ABLAUFARTEN	233
ABBILDUNG 56: EINLERN- UND TRENDKURVE BEI PAPIERGEBUNDENEN TEXT- UND BILDINFORMATIONEN	234
ABBILDUNG 57: BEOBACHTETE DURCHFÜHRUNGSZEITEN BEI INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN BILD	235
ABBILDUNG 58: BEOBACHTETE DURCHFÜHRUNGSZEITEN BEI INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN SIGNAL	235
ABBILDUNG 59: BEOBACHTETE DURCHFÜHRUNGSZEITEN BEI INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN SPRACHE	236
ABBILDUNG 60: BEOBACHTETE DURCHFÜHRUNGSZEITEN BEI INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN TEXT	236
ABBILDUNG 61: BEOBACHTETE DURCHFÜHRUNGSZEITEN BEI INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN ANIMATION	237
ABBILDUNG 62: BEOBACHTETE DURCHFÜHRUNGSZEITEN BEI INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN VIDEO.....	237
ABBILDUNG 63: BEOBACHTETE DURCHFÜHRUNGSZEITEN BEI INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN AUGMENTED REALITY	238
ABBILDUNG 64: BEISPIEL STANDARDISierter INPUT-DATEN (ERWEITERTE MTM-UAS ANALYSE)	271
ABBILDUNG 65: AUFBAU DES POC-DEMONSTRATORS	273

ABBILDUNG 66: AUSZUG ERWEITERTE MTM-UAS ANALYSE DER 3D-DRUCKER MONTAGE	276
ABBILDUNG 67: VORSELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (MONTAGESTATION 1).....	278
ABBILDUNG 68: FINAL SELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (MONTAGESTATION 1).....	279
ABBILDUNG 69: VORSELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (MONTAGESTATION 2).....	280
ABBILDUNG 70: FINAL SELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (MONTAGESTATION 2).....	281
ABBILDUNG 71: VORSELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (MONTAGESTATION 3).....	282
ABBILDUNG 72: FINAL SELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (MONTAGESTATION 3).....	283
ABBILDUNG 73: VORSELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (GESAMTMONTAGELINIE).....	284
ABBILDUNG 74: FINAL SELEKTIERTE KOMPONENTEN DES LABOR USE CASES (GESAMTMONTAGELINIE).....	285
ABBILDUNG 75: ERWEITERTE MTM-UAS ANALYSE FÜR DAS PRODUKT AA, STELLVERTRETEND FÜR EINE VARIANTE.....	286
ABBILDUNG 76: ERWEITERTE MTM-UAS ANALYSE DES PRODUKTS AB, STELLVERTRETEND FÜR EINE VARIANTE	286
ABBILDUNG 77: VORSELEKTIERTE KOMPONENTEN DES INDUSTRIE USE CASES (MONTAGESTATION 1).....	287
ABBILDUNG 78: FINAL SELEKTIERTE KOMPONENTEN DES INDUSTRIE USE CASES (MONTAGESTATION 1).....	288
ABBILDUNG 79: VORSELEKTIERTE KOMPONENTEN DES INDUSTRIE USE CASES (MONTAGESTATION 2).....	289
ABBILDUNG 80: FINAL SELEKTIERTE KOMPONENTEN DES INDUSTRIE USE CASES (MONTAGESTATION 2).....	290
ABBILDUNG 81: VORSELEKTIERTE KOMPONENTEN DES INDUSTRIE USE CASES (GESAMTMONTAGELINIE).....	291
ABBILDUNG 82: FINAL SELEKTIERTE KOMPONENTEN DES INDUSTRIE USE CASES (GESAMTMONTAGELINIE).....	292

ABBILDUNG 83: AUTONOMIEGARDE VON KOMPONENTEN DAS	293
ABBILDUNG 84: EINFLÜSSE AUF WIRTSCHAFTLICHKEITS- UND PRODUKTIVITÄTSEFFEKTE DAS.....	294

13 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1:	VERSCHIEDENE BEGRIFFSVERWENDUNG INFORMATIONSTECHNISCHER ASSISTENZSYSTEME	16
TABELLE 2:	BESCHREIBUNGSKRITERIEN, MÖGLICHKEITEN UND RESTRIKTIONEN DAS....	33
TABELLE 3:	ERKENNTNISSE ZUM STAND DER FORSCHUNG ZUR PLANUNG UND EVALUIERUNG DAS (X = ZUTREFFEND), ARBEITSAUFGABE – MENSCH – TECHNIK	35
TABELLE 4:	ERKENNTNISSE ZUM STAND DER FORSCHUNG ZUR PLANUNG UND EVALUIERUNG DAS (X = ZUTREFFEND), ORGANISATION – OPERATIVE ANWENDBARKEIT	36
TABELLE 5:	ANFORDERUNGEN AN DAS VORGEHENSMODELL	41
TABELLE 6:	WEITERE ANFORDERUNGEN AN DAS VORGEHENSMODELL	43
TABELLE 7:	AUSPRÄGUNGEN IM GESTALTUNGSFELD DEGREE – INFORMATIONSGRAD	48
TABELLE 8:	AUSPRÄGUNGEN IM GESTALTUNGSFELD DESIGN – INFORMATIONSDARSTELLUNG	49
TABELLE 9:	AUSPRÄGUNGEN IM GESTALTUNGSFELD DESIGN – INFORMATIONSTRANSFER	51
TABELLE 10:	KOMPONENTEN DAS ZUSAMMENGEFASST IM T-POOL	53
TABELLE 11:	KOMPONENTEN DAS ZUSAMMENGEFASST IM D-POOL	53
TABELLE 12:	KOMPONENTEN DAS ZUSAMMENGEFASST IM TS-POOL	54
TABELLE 13:	KOMPONENTEN DAS ZUSAMMENGEFASST IM IR-POOL	54
TABELLE 14:	KOMPONENTEN DAS ZUSAMMENGEFASST IM II-POOL.....	55
TABELLE 15:	KOMPONENTEN DAS ZUSAMMENGEFASST IM IP-POOL	55
TABELLE 16:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER MOBILITÄTSGRAD	58
TABELLE 17:	PRODUKTKOMPLEXITÄTSINTERVALLE	61
TABELLE 18:	ARBEITSPLATZKOMPLEXITÄTSINTERVALLE	63
TABELLE 19:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER KOGNITIVE WERKERBELASTUNG	64
TABELLE 20:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER FLEXIBILITÄTSGRAD	65

TABELLE 21:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER INFORMATIONSQUELLEN.....	66
TABELLE 22:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER ZEITPUNKT DER INFORMATIONSBEREITSTELLUNG	67
TABELLE 23:	SKALIERUNG DES BESCHREIBUNGSPARAMETERS ZUGANG ZU DER WERKERINFORMATION	67
TABELLE 24:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER ZUGANG ZUR WERKERINFORMATION	68
TABELLE 25:	AUGMENTED REALITY, AUGMENTED VIRTUALITY UND VIRTUAL REALITY	68
TABELLE 26:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER REALE VERSUS VIRTUELLE WERKERINFORMATIONEN	69
TABELLE 27:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER MÖGLICHKEIT DER DIALOGFÜHRUNG / DOKUMENTATION	70
TABELLE 28:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER MÖGLICHKEIT DER INTERAKTION	71
TABELLE 29:	TENDENZKENNZAHLEN ZUM BESCHREIBUNGSPARAMETER AKZEPTANZ UND MOTIVATION DES MITARBEITERS.....	72
TABELLE 30:	REGELWERK – BESCHREIBUNGSPARAMETER / TENDENZKENNZAHLEN ZUM T-POOL	73
TABELLE 31:	REGELWERK – BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN ZUM D-POOLS.....	74
TABELLE 32:	REGELWERK – BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN ZUM TS-POOLS.....	74
TABELLE 33:	REGELWERK – BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN ZUM IR-POOLS.....	75
TABELLE 34:	REGELWERK – BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN ZUM II-POOLS	75
TABELLE 35:	MENSCHLICHE BESCHREIBUNGSPARAMETER	82
TABELLE 36:	REGELWERK – EINFLÜSSE AUF ORGANISATORISCHE ZIELSETZUNGEN DAS.....	87
TABELLE 37:	EINFLÜSSE DAS AUF PAPIERGEBUNDENE AUFTRAGSHANDHABUNGSZEITEN	94
TABELLE 38:	EINFLÜSSE DAS AUF DOKUMENTATIONSZEITEN	94
TABELLE 39:	EINFLÜSSE DAS AUF SUCHZEITEN.....	95

TABELLE 40:	EINFLÜSSE DAS AUF KONFIGURATIONSZEITEN VON HILFS-, BETRIEBSMITTELN, WERKZEUGEN	95
TABELLE 41:	REGELWERK – INFORMATIONSPERARBEITUNGS- UND -INTERPRETATIONSZEIT	96
TABELLE 42:	REGELWERK – ZU DEVICE – INTERAKTIONSZEIT	97
TABELLE 43:	REGELWERK – ZU PAPIERGEBUNDENEN AUFTRAGSHANDHABUNGSZEITEN ...	98
TABELLE 44:	REGELWERK – ZU MANUELLEN DOKUMENTATIONSZEITEN.....	99
TABELLE 45:	REGELWERK – ZUR BESTIMMUNG VON SUCHZEITEN UND -AUFWÄNDEN	99
TABELLE 46:	REGELWERK – ZUR BESTIMMUNG KONFIGURATIONSZEITEN UND -AUFWÄNDEN	100
TABELLE 47:	DURCHSCHNITTLLICHE AUSFÜHRUNGSZEIT BEI TEXT- UND BILDINFORMATIONEN.....	107
TABELLE 48:	BEOBACHTETE AUSFÜHRUNGSZEITEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN	108
TABELLE 49:	TRENDFUNKTIONEN IN BEZUG AUF EINLERN- UND TRAININGSZEITEN.....	108
TABELLE 50:	EINTEILUNG DER MENSCHLICHEN FEHLERWAHRSCHEINLICHKEIT IN ZUVERLÄSSIGKEITSKLASSEN	114
TABELLE 51:	EINFLUSSFAKTOREN ZUR BERECHNUNG DES BELASTUNGSVEKTORS.....	117
TABELLE 52:	UNTERKOMPONENTEN VON PSF1	117
TABELLE 53:	FEHLERPUNKTE, -WEGE, -WAHRSCHEINLICHKEITEN UND - ENDPUNKTWAHRSCHEINLICHKEIT	122
TABELLE 54:	BERECHNUNGSSCHRITTE ZUR BESTIMMUNG DER MENSCHLICHEN FEHLERWAHRSCHEINLICHKEIT	123
TABELLE 55:	REGELWERK – GESAMTEINFLUSS AUF EINE MONTAGETÄTIGKEIT	125
TABELLE 56:	REGELWERK – REDUKTION HEP DURCH INTEGRATION VON HILFS-, BETRIEBSMITTEL UND WERKZEUGE.....	126
TABELLE 57:	BESTIMMUNG DER BESCHREIBUNGSPARAMETER	139
TABELLE 58:	INTERAKTIONSAUFWAND OHNE UND MIT AUTOMATISIERTER WEITERSCHALTUNG.....	142
TABELLE 59:	ZEITAUFWAND IM FALLE EINER MANUELLEN BEDIENUNG VON KOMPONENTEN DES TS-POOLS.....	142

TABELLE 60:	DURCHSCHNITTLICHER ZEITAUFWAND ZUR INFORMATIONSAUFNAHME UND –VERARBEITUNG.....	143
TABELLE 61:	ANMERKUNGEN ZU INVESTITIONEN IN SOFT- UND HARDWARE (ISH)	145
TABELLE 62:	ANZAHL MÖGLICHER KOMPONENTEN.....	147
TABELLE 63:	BINÄRE CODIERUNG DER KOMPONENTEN DAS	153
TABELLE 64:	ERGÄNZENDE EINGABEN ZUR QUANTIFIZIERUNG DER EINLERN- UND TRAININGSZEIT	162
TABELLE 65:	BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN, LABOR USE CASE MAP1	163
TABELLE 66:	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, LABOR USE CASES MAP 1	163
TABELLE 67:	BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN, LABOR USE CASE MAP 2	164
TABELLE 68:	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, LABOR USE CASES MAP 2	165
TABELLE 69:	BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN, LABOR USE CASE MAP 3	165
TABELLE 70:	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, LABOR USE CASES MAP 3	166
TABELLE 71:	BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN, LABOR USE CASE GML	166
TABELLE 72:	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, LABOR USE CASE GML	167
TABELLE 73:	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, OHNE TS-KOMPONENTEN	169
TABELLE 74:	VARIANTENAUSPRÄGUNGEN DER PRODUKTE AA UND AB	170
TABELLE 75:	FORECAST DER PRODUKTIONSMENGE 2018 BIS 2022	171
TABELLE 76:	BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN, INDUSTRIE USE CASE MAP 1	172
TABELLE 77:	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, INDUSTRIE USE CASES MAP 1	172
TABELLE 78:	BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN, INDUSTRIE USE CASE MAP 2.....	173

TABELLE 79: BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, INDUSTRIE USE CASES MAP 2 173

TABELLE 80: BESCHREIBUNGSPARAMETER UND TENDENZKENNZAHLEN, INDUSTRIE USE CASE GML..... 174

TABELLE 81: BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE UND AMORTISATIONSZEIT, INDUSTRIE USE CASES GML..... 174

TABELLE 82: ZUSAMMENSETZUNG DER WERKER-PROFILE (CL1 BIS CL5)..... 177

TABELLE 83: KORRELATIONSERGEBNISSE ZWISCHEN WERKER KOMPETENZ UND AUTONOMIEGRA 177

TABELLE 84: ÜBERSICHT DER ERMITTELTEN AMORTISATIONSZEITEN 178

TABELLE 85: DARSTELLUNG DER ANFORDERUNGSERFÜLLUNG DES VORGEHENSMODELLS 185

TABELLE 86: INFORMATIONSPRÄSENTATIONSFORMEN UND DEREN INFORMATIONSGEHALT.....228

TABELLE 87: MTM-UAS AUFBAUSTUFEN (CODIERUNG) UNTER VERWENDUNG EINES WERKZEUGES229

TABELLE 88: MTM-UAS ANALYSEINFORMATIONEN ZUR BESTIMMUNG DER EINLERN- UND TRAININGSZEIT233

TABELLE 89: VORGEHENSWEISE BEI EINER HRA238

TABELLE 90: VERFAHREN ZUR BEWERTUNG DER MENSCHLICHEN ZUVERLÄSSIGKEIT239

TABELLE 91: ESAT STANDARDWÖRTER, ZEITEN UND VORGEWICHTE240

TABELLE 92: PSF2 – AUFGABENCHARAKTERISTIK.....242

TABELLE 93: PSF3 – PERSONALFAKTOREN242

TABELLE 94: PSF4 – UMWELTFAKTOREN243

TABELLE 95: PSF5 – SYSTEMFAKTOREN243

TABELLE 96: BESTIMMBARKEIT DES SPANNUNGSVEKTORS G AUS EINER MTM-UAS ANALYSE244

TABELLE 97: INPUTINFORMATION ZUR TEILE- UND BAUGRUPPENKOMPLEXITÄT (PRODUKTKOMPLEXITÄT)246

TABELLE 98: INFORMATIONEN ZU DEN PERFORMANCE SHAPE FAKTORS247

TABELLE 99: BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN DES T-POOLS248

TABELLE 100: BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN DES D-POOLS	252
TABELLE 101: BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN DES TS-POOLS	255
TABELLE 102: BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN DES IR-POOLS	258
TABELLE 103: BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN DES II-POOLS.....	260
TABELLE 104: BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN DES IP-POOLS.....	261
TABELLE 105: ERWEITERTE MTM-UAS ANALYSE AM BEISPIEL EINES SPIELZEUG LKWs.	262
TABELLE 106: MORPHOLOGIE ZUR VORSELEKTION (DATENBASIS).....	264
TABELLE 107: HANDHABUNGS- UND MONTAGEKOMPLEXITÄTSATTRIBUTE	266
TABELLE 108: REFERENZINTERVALL DES BESCHREIBUNGSPARAMETERS	268
TABELLE 109: OPTIMIERUNGSVERFAHREN ZUR LÖSUNG DES AUFGEZEIGTEN OPTIMIERUNGSPROBLEMS.....	270
TABELLE 110: SELEKTIERT KOMPONENTEN DES DAS	272
TABELLE 111: QUALITÄTSMERKMALE DES ENTWICKELTEN MICROSOFT-EXCEL BASIERTEN PoC-DEMONSTRATORS	274
TABELLE 112: PERFORMANCE SHAPE FACTORS ZUM LABOR USE CASE	277

14 Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
A	Alter
AD	Autonomy Degree (dt. Autonomiegrad)
ADL	Montagepositionen des Mitarbeiters (Werkers)
AGB	Anzahl Gehbewegungen
AI	Ability to Interact (dt. Möglichkeit der Interaktion)
Anz.	Anzahl
AR	Augmented Reality
AS	Assistenzsystem
AV	Augmented Virtuality
AWI	Access to Workerinformation (dt. Zugang zur Werkerinformation)
Bez.	Bezeichnung
c	Grenzwert
CAD	Computer Aided Design (dt. rechnerunterstütztes Konstruieren)
C_h	Handhabungskomplexität
CIM	Computer-Integrated-Manufacturing (dt. rechnergestützte Produktion)
C_{Produkt}	Produktkomplexität
CL	Competence Level (dt. Kompetenzniveau)
CPMS	Cyber-physische Montagesysteme
CPPS	Cyber-physische Produktionssysteme
CPS	Cyber-physische Systeme
C_{Teil}	Teilekomplexität
CWL	Cognitive Work Load (dt. kognitive Belastung)
D	Art des Arbeitsplans
DAS	Digitale Assistenzsysteme / Digitales Assistenzsystem
DC-CPPS	Doktoratskolleg cyber-physischer Produktionssysteme
DF	Degree of Flexibility (dt. Flexibilitätsgrad)
D_i	Komponenten Digitaler Assistenzsysteme des D-Pools
DIN	Deutsches Institut für Normung
DM	Degree of Mobility (dt. Mobilitätsgrad)
DSRM	Design Science Research Methodology Process Model
DZ	Doppelzylinder

EA	Evolutionärer Algorithmus
EAWS	Eropean Assessment Worksheet
eBom	Engineering Bill of Material
E _{MONT}	Erfahrungen des Montagemitarbeiters
ERP-System	Enterprise Ressource Planning System
ESAT	Expertensystem für Aufgabentaxonomie
FAS	Fixer Anteil in Stunden
FF	Fleishman-Faktor
FFG	Österreichische Forschungs- Förderungsgesellschaft
FhA	Fraunhofer Austria Research GmbH
FTA	Full-Time-Äquivalent (dt. Vollzeit-Mitarbeiter)
G	Geschlecht
G (S)	Spannungsvektor
GA	Genetischer Algorithmus
GML	Gesamt-Montagelinie
GUI	Grafisches User-Interface
H	Entropie
HB	Entropie von Bauteilen
HCR	Human Cognitive Reliability
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique
HEP	Human-Error-Probability (dt. HEP)
HEP _A	HEP (Ausgangssituation)
HEP _E	Einfluss auf die HEP
HfE	Fixe Hardwarekosten in Euro
HRA	Human Reliability Analysis (dt. Zuverlässigkeitsanalyse des Menschen)
HUAS	Entropie von Prozesselementen
HvE	Variable Hardwarekosten in Euro
IAS	Interaktives Assistenzsystem
i.d.R.	in der Regel
ICS	Produktbezeichnung
IHK	Industrie- und Handelskammer
II _i	Komponenten Digitaler Assistenzsysteme des II-Pools
IK	Installation und Konfiguration

IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IMW	Institut für Managementwissenschaften
INVEST	Investitionserfordernisse beziehungsweise -aufwände
IPH	Institut für Integrierte Produktion
IP _i	Komponenten Digitaler Assistenzsysteme des IP-Pools
IPRI	International Performance Research Institute
IR _i	Komponenten Digitaler Assistenzsysteme des IR-Pools
ISH	Investitionen in Soft- und Hardware
IT	Informationstechnologie
K	Fract
KAS	Kognitives Assistenzsystem
KLT	Kleinladungsträger
KPI	Key Performance Index (dt. Leistungskennzahl)
LEARN _A	Einlern- und Trainingszeit (Ausgangssituation)
LEARN _E	Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit
m	männlich
MAF	Mitarbeitergebundener Materialfluss
MAPPS	Maintenance Personal Performance Simulation
mBom	Bill-of-Material
MES	Manufacturing Execution System
MHv	Multiplikator
MIS	Mitarbeiter Informationssystem
MMAS	Mixed-Model Assembly Systems (Mixed-Model Montagesysteme)
MMS	Mensch-Maschinen System
MOST	Maynard Operation Sequence Technique
MAP	Montagearbeitsplatz
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MTM	Methods Time Measurement (dt. Arbeitsablauf-Zeitanalyse)
MTM-1	MTM Methodenniveau 1
MTM _A	Ausführungszeit (Ausgangssituation)
MTM _E	Einfluss auf die Ausführungszeit
MTM-MEK	MTM für die Einzel- und Kleinserienfertigung
MTM-UAS	MTM Universelles Analysiersystem
MTO	Mensch-Technik-Organisation

MvAS	Multiplikator für variablen Anteil in Stunden
Nr.	Nummer
OAT	Methode zur Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit für Diagnose und Entscheidungsaufgaben nach einem Störfall in einem Kernkraftwerk durch ein Zeit-Zuverlässigkeitsmodell
OWAS	Ovako Working Posture Analysing System
PEP	Produktentstehungsprozess
PLC	Programmable Logic Controller (dt. speicherprogrammierbare Steuerung)
PLM	Product-Life-Management
PoC-Demonstrator	Proof-of-Concept-Demonstrator (dt. Demonstrator zum Nachweis der Machbarkeit)
PSF ₁	Performance Shape Factor - Aufgabentyp
PSF ₂	Performance Shape Factor - Aufgabencharakteristik
PSF ₃	Performance Shape Factor - Personalfaktoren
PSF ₄	Performance Shape Factor - Umgebungsfaktoren
PSF ₅	S Performance Shape Factor - ystemfaktoren
PTL	Anzahl von Behältern im Arbeitssystem
PWL	Anzahl verschiedener Teile im Arbeitssystem
RC	Reliability Classes (dt. Zuverlässigkeitsklassen)
RDZ	Doppelzylinder Rundprofil
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RvV	Real versus Virtual
SAIT	System Analysis of Integrated Networks of Tasks
SfE	Fixe Softwarekosten in Euro
SHARP	Systematic Human Action Reliability Procedure
SI	Source of Information (dt. Informationsquelle)
SLIM-MAUD	Success-Likelihood Index Methodology
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SU	System Usability
SUS	System Usability Scale
SvZ	Systeme vorbestimmter Zeiten
SWOT	engl. Akronym für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken)
TESEO	Tecnica Empirica Stima Errori Operatori
TDZ	Tendenzkennzahl

THERP	Technique of Human Error Prediction
T _i	Komponenten Digitaler Assistenzsysteme des T-Pools
TIP	Time of Information Provision
TMU	Time Measurement Unit
TRL	Technology Readyness Level (dt. Technologie-Reifegrad)
TS _i	Komponenten Digitaler Assistenzsysteme des TS-Pools
TU Wien	Technische Universität Wien
TWL	Anzahl von Werkzeugen am Arbeitsplatz
UPC-UA	OPC Unified Architecture (Maschine-Maschine Kommunikationsprotokoll)
UX	User Experience
v.a.	vor allem
VAS	Variabler Anteil in Stunden
VASS	Visuelles Assistenzsystem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
w	weiblich
WF	Werkerführung
WF	Work Factors
WIS	Werkerinformationssystem
ZK	Zuverlässigkeitsklassen
ξ	Akzeptanzniveau

Grundphasen		Planung und Bewertung von Montagesystemen				Digitale Assistenzsysteme	
		Bullinger (1986)		Konold (2003)		Lotter (2012)	
	Phasen	Tätigkeiten	Phasen	Tätigkeiten	Phasen	Tätigkeiten	Ausprägung der Berücksichtigung
Vorbereitung	1. Projektorganisation	Projektmanagement	1. Aufgabenerstellung	Ziele, Verantwortlichkeiten, Terminrahmen, Ablauf	1. Anforderungsliste	Mengengerüst	keine
	2. Konzeption	Planungsdaten Planungsziele Prinziplösung Montagekostenkalkulation	Situationsanalyse Aufgabe abgrenzen Verfügbare Hallenflächen vorgeben	Planungsdaten beschaffen Situationsanalyse Aufgabe abgrenzen Verfügbare Hallenflächen vorgeben	Nutzungsdauer Nutzungsgrad SoIL-Leistung Amortisationsdauer	keine	
Großplanung	3. Ablaufplanung	Erzeugnisstrukturierung Montageablaufstruktur Vorgabezeiten Arbeitswert	2. Großplanung	Montagesystem-Ausbringung Arbeitsabläufe und Montagestruktur entwickeln Montageabschnitte bilden Montagesystemalternativen entwickeln notwendige Hallenflächen ermitteln Personalbedarf planen	2. Produktanalyse	Teileanzahl Anlieferungszustand Handhabungseigenschaften Fügeeinrichtungen Fügeverfahren Qualitätsanforderungen	gering
	4. Montagesystementwurf	Kapazitätsstellung Bildung, Bewertung, Verbesserung der Arbeitsinhalte Technik Organisation Prinzipanordnung Materialbereitstellung Auswahl Montagesystem	Projektkalkulation und Wirtschaftlichkeitsrechnung	Lösungsvarianten bewerten und auswählen	3. Montageablaufanalyse Produkt Aufbau und Füge-situation Fügerangfolge Werkstückträgerkonstruktion	zum Teil	
Feinplanung	5. Ausarbeitung	Einplanung des Produktionsprogramms Organisatorische und technische Gestaltung der Arbeitsplätze Struktur, Montagepunkt- und und tech. Gestaltung automat. Bewertung, Überprüfung, Vorgaben Erstellung Montageunterlagen	3. Feinplanung	Gesamt- und Teilsystem detaillieren Terminplan kritische Prozesse absichern Personaleinsatz planen Wirtschaftlichkeitsachsweis prüfen	7. Personalbedarfsermittlung 8. Verfügbarkitseermittlung	keine	keine
	6. Realisierung	Betriebsmittelkonstruktion, -bau und -beschaffung Analyse Personalanforderungen und -eignung Personalbedarf	4. Realisierung	Beschaffung veranlassen Arbeitsplätze nach MTM gestalten Personal schulen Montagesystem installieren Dokumentation erstellen Ausprobe	Stationenanzahl Einzelverfügbarkeit der Stationen Anlagenstrukturierung Anlaufverhalten Personalqualifizierung	nein	
Betrieb	7. Betrieb	Controlling Rationalisierung	5. Fertigungsanlauf	Systemanlauf analysieren Fehler beseitigen Dokumentation ggf. korrigieren Abnahme durchführen	9. Pflichtenheft 10. Investitionsrechnung 11. Bewertung und Auswahl	keine	keine
						nein	

 Abbildung 51: Vorgehensmodelle zur Planung und Evaluierung von Montagesystemen
 (eigene Darstellung)

Merkmale / Komponenten														
Kategorie	Informationstyp					Informationsmenge								
	Produktbezogene Informationen	Auftragsbezogene Informationen	Tätigkeits- und prozessbezogene Informationen	Ablaufbezogene Informationen	Qualitätsbezogene Informationen	Allgemeine Informationen								
Degree (Informationsgrad) WAS	gering (Hinweis)					mittel (Zusammenfassung)				hoch (vollständige Erklärung)				
	Visuell					Auditiv				Haptisch				
	Signal	Text	Animation	Video	Sprache	Augmented								
Design (Informations-präsentation) WIE in welcher WEISE	Schriftgröße / Schriftfarbe					Bildgröße / Bildfarbe				Videogröße / Videofarbe	Lautstärke / Tonhöhe			
	Manual					Controll-System				Data Driven via BPM	...			
	Grundlagen Informationen													
Device (Informations-übertragung) WOMIT	Input Informationen des physischen Ablaufes													
	Detektion mittels Sprache	Detektion mittels Button (manuell)	Detektion mittels Button (automatisch)	Detektion mittels Nährungs-sensorik	Detektion mittels RFID (manuell)	Detektion mittels RFID (automatisch)	Detektion mittels Hand-Local-Positioning	Detektion mittels Werkzeug-Local-Positioning	Detektion mittels Kamera	...				
	Output Informationen an Werker													
	Screen	Touch Screen	Tablet	Glass	Projection	Light	Voice	Laser	Signal	...				
	Output Information Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge													
	Interaktionssignal von...													
	Schraubsystem	Messsystem	Markierungs-system	Verspannungs-system	Reinigungs-system	Robotiksystem	Klebsystem	Halb-Automat	Verpacken	Leitungen-Montierung	Normteile montieren			
	Input Information Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge													
	Interaktionssignal an...													
	Schraubsystem	Messsystem	Markierungs-system	Verspannungs-system	Reinigungs-system	Robotiksystem	Klebsystem	Halb-Automat	Verpacken	Leitungen-Montierung	Normteile montieren			
Technology Readiness Level														
Technology Readiness Level 9 - 8					Technology Readiness Level 7 - 5					Technology Readiness Level 4 - 1				
Informations-system (Data-Processing)														

Abbildung 52: Morphologie DAS (eigene Darstellung)

Variablen	Beschreibung	Likert Skalierung			
		F	D	C	M
Picking Technology	Festgelegt (F): Operator nimmt Teil immer von der selben Position in einem Großlager.				
	Signal (S): Operator greift Teil von einer Position die mit einem Signal angezeigt wird (Licht, Display). Vergleichen (V): Operator muss simple Informationen vergleichen (Symbole, Farben). Manuell (M): Operator muss umfangreiche Informationen aus einem Ladungsverzeichnis lesen.	1	2	3	4
Bulk/Sequence KIT	Sequenziert (S): Die Teile sind in der Packung in Abhängigkeit ihrer Montagefolge hinterlegt.	S	K	B	
	KIT(K): Teile werden in Kits geliefert. Diese stellen einen Satz Teile für genau eine Montagetätigkeit dar. Bulk/Schüttgut(K): Teile sind je nach Type in Packungen enthalten.	1	2	3	
# Packaging types	Die Gesamtzahl unterschiedlicher Verpackungstypen, mit spezifischem Layout. Somit sind zwei identische Boxen mit unterschiedlichem Inhalt zwei verschiedene Typen.	1	2-4	5-8	>8
		1	2	3	4
# Tools per workstation	Anzahl der Werkzeuge, exklusive automatischer Werkzeuge, die ein Operator braucht, um alle Montagetätigkeiten und Montagevarianten an seiner Station durchführen zu können.	1	2-4	5-8	>8
		1	2	3	4
# Machines per workstation	Alle automatischen Tätigkeiten die Maschinen ohne Assistenz eines Operators, nach einem automatischen oder manuellen Start, durchführen können.	0	1	2	>2
		0	1	2	3
# Work methods	Jeder spezifische Satz an Arbeitsmethoden den ein Operator an seinem Arbeitsplatz zu meistern hat. Eine Methode enthält mehrere kleine Arbeitsschritte.	0-2	3-5	6-8	>8
		1	2	3	4
Distance to parts	Weiteste Distanz zwischen der Position des Operators (oder dem Zentrum der Arbeitsplätze) und den Teilen (Materialien).	0-1	1, 1-2	2, 1-4	>4
		1	2	3	4
# Variants same model	Größte Anzahl an Varianten die einem Modell zugehörig sind, bezogen auf alle Modelle deren Teile an diesem Arbeitsplatz montiert werden.	1	2-3	4-5	>5
		1	2	3	4
# Variants in workstation	Gesamtanzahl der Teilevarianten aufsummiert über alle Modelle die an diesem Arbeitsplatz montiert werden.	1	2-4	5-10	>10
		1	2	3	4
# Different parts in workstation	Gesamtzahl der einzelnen Teilreferenzen die an diesem Arbeitsplatz montiert werden, inklusive aller Varianten und Modelle, die typischer Weise innerhalb eines Jahres anfallen.	1-4	5-10	11-20	>20
		1	2	3	4
# Assembly directions	Anzahl aller unterschiedlichen Positionen, die ein Operator einnehmen muss um einen kompletten Zyklus an seinem Arbeitsplatz durchführen zu können. Hierfür werden sowohl Positionsänderungen des Oberkörpers und der Füße, nicht jedoch kleine Handbewegungen, berücksichtigt.	1	2-3	4-5	>5
		1	2	3	4

Abbildung 53: Komplexitätstreiber und deren Skalierung [116]

Tabelle 86: Informationsrepräsentationsformen und deren Informationsgehalt

Informationsdarstellungsform	Informationen zum Tätigkeitsort	Informationen zur direkten Tätigkeitsdurchführung	Informationen zu benötigten Hilfs- und Betriebsmitteln
Signal	Auf den Ort der Tätigkeit kann hingewiesen werden. Bezug auf den realen Ort kann genommen werden.	Es können keine Angaben zur Tätigkeitsausführung angezeigt werden	Auf Hilfs- und Betriebsmittel kann hingewiesen werden
Text	Auf den Ort der Tätigkeit kann hingewiesen werden Beschreibender Bezug auf den realen Ort kann genommen werden	Es können Angaben zur Tätigkeitsausführung angezeigt werden (Beschreibender Art)	Auf Hilfs- und Betriebsmittel kann hingewiesen werden
Bild	Auf den Ort der Tätigkeit kann hingewiesen werden. Sequenziell, bildlich beschreibender Bezug auf den realen Ort kann genommen werden	Es können Angaben zur Tätigkeitsausführung angezeigt werden (Bildbeschreibender, statischer Art, Ausschnitt aus der realen Umgebung)	Auf Hilfs- und Betriebsmittel kann hingewiesen werden

Animation	Auf den Ort der Tätigkeit kann hingewiesen werden sequenziell, bildlich beschreibender Bezug auf den realen Ort kann genommen werden	Es können Angaben zur Tätigkeitsausführung angezeigt werden (Bildbeschreibender, statischer Art, Ausschnitt aus der realen Umgebung, Ausschnittsfolgen aus der realen Umgebung)	Auf Hilfs- und Betriebsmittel kann hingewiesen werden
Video	Auf den Ort der Tätigkeit kann hingewiesen werden dynamisch, bildlich beschreibender Bezug auf den realen Ort kann genommen werden	Es können Angaben zur Tätigkeitsausführung angezeigt werden (Bildbeschreibender, statischer und dynamischer Art, Ausschnitt aus der realen Umgebung, dynamische Ausschnittsfolgen aus der realen Umgebung)	Auf Hilfs- und Betriebsmittel kann hingewiesen werden
Voice	Auf den Ort der Tätigkeit kann hingewiesen werden sprachlich beschreibender Bezug auf den realen Ort kann genommen werden	Es können Angaben zur Tätigkeitsausführung ausgegeben werden (Sprachbeschreibender Art, es kann auf die reale Umgebung eingegangen werden)	Auf Hilfs- und Betriebsmittel kann hingewiesen werden
Augmented Reality	Auf den Ort der Tätigkeit kann hingewiesen werden ein direkter (leitender) dynamischer Bezug auf den realen Ort kann genommen werden	Es können Angaben zur Tätigkeitsausführung angezeigt werden (Bildbeschreibender, statischer und dynamischer Art, Ausschnitt aus der realen Umgebung, direkte, dynamische Interaktion mit der realen Umgebung)	Auf Hilfs- und Betriebsmittel kann hingewiesen werden

Tabelle 87: MTM-UAS Aufbaustufen (Codierung) unter Verwendung eines Werkzeuges [86]

Tätigkeit	Tätigkeits-, inkl. Werkzeugbeschreibung	MTM-UAS Code
Schraubarbeiten	Metrische Schrauben einschrauben und festziehen mit Maschinenschrauber	M-SHS
	Metrische Schrauben einschrauben und festziehen mit Drillschrauber	M-SJS
	Metrische Schrauben einschrauben und festziehen mit Schraubendreher	M-SKS
	Metrische Schrauben einschrauben und festziehen mit Ratsche	M-SLS
	Metrische Schrauben einschrauben und festziehen mit Gabel-, Ring-, Sechskantschlüssel mit Umsetzen	M-SMS
	Blechschauben ansetzen, einschrauben, festziehen mit Maschinenschrauber	M-SNS
	Blechschauben ansetzen, einschrauben, festziehen mit Drillschrauber	M-SOS
	Blechschauben ansetzen, einschrauben, festziehen mit Schraubendreher	M-SPS
	Zuschläge: Zweites Schraubteil (Schraube oder Mutter) mit Werkzeuge	M-SGA
Behandeln	Reinigen mittels Bürste, Besen, (Druckluft)	M-RAB M-RAC

		M-RAD
	Reinigen mittels Pinsel	M-RBB M-RBC M-RBD
	Reinigen mittels Lappen, Tuch	M-RCB M-RCC M-RCD
	Auftragen von Öl, Farbe, Reinigungsmittel mittels Pinsel, Ölkanne, Lappen, Tuch	M-BHA M-BHB M-BHC M-BHD
	Auftragen von Öl, Farbe, Reinigungsmittel mittels Spraydose	M-BIB M-BIC M-BID
	Auftragen von Öl, Farbe, Reinigungsmittel mittels Fettpresse	M-BKA
	Auftragen von Öl, Farbe, Reinigungsmittel mittels Rolle	M-BRB M-BRC M-BRD
	Auftragen von Klebstoff, Dichtmasse mittels Pinsel, Spachtel	M-BNA M-BNB M-BNC M-BND
	Auftragen von Klebstoff, Dichtmasse mittels Tube, Stift	M-BQA M-BQB M-BQC M-BQD
Normteile montieren	Mit einem Werkzeug	M-NAA
	Mit zwei Werkzeugen	M-NBA
	unter Verwendung eines Spezialwerkzeuges	M-NCA
	Clips eindrücken mit Werkzeug	M-CEC M-CED
	Clips ausrichten mit Werkzeug	M-CAB
	O-Ring mit Werkzeug	M-NFE
	Winkelgelenk mit Werkzeug	M-NLE
	Schraubchelle mit Schrauber, Zange	M-NME
	Schraubchelle mit Schraubendreher	M-NMB
Sicherungsblech mit zwei Werkzeugen	M-NEZ	
Prüfen oder Messen	mit Lehre	M-PAA M-PAB M-PAC M-PBA

		M-PBB
	mit Zeigermessgerät	M-PCA M-PCB M-PDA M-PDB
	mit Skalenmessgerät	M-PEA M-PEB M-PEC M-PFA M-PFB
Markieren	mit Körner oder Schlagzahl	M-MAA M-MAB
	mit Zirkel	M-MBA M-MBB
	mit Schreibzeug	M-MGZ
	mit Pinsel	M-MPS
	mit Stempel	M-MSS
Klebearbeiten	Kleben von Schild oder Aufkleber genau mit Schablone	M-KAC
	Kleben von Schild oder Aufkleber vom Spender ungefähr und genau ohne und mit Schablone	M-KBA M-KBB M-KBC
	Kleben von Schild oder Aufkleber von Karte genau mit Schablone	M-KCC
	Klebeband kleben einzeln oder von Abroller (hier ist zwingend eine Zusatzinformation von Nöten)	M-KKA M-KKB
	Klebeband kleben mit Handabroller	M-KKC M-KKD
Festspannen und Lösen	Klemmzange	M-FAA
	Schraubzwinde	M-FCA
	Spannpratzen	M-FLA
	Spannhebel	M-FMA M-FNB
	Schraubstock	M-FPA M-FQA
	Backenfutter	M-FRAU
	Magnetplatte	M-FSA
	Zuschlag – bei Verwendung eines weiteren Hilfsmittels/Schraubstockbacken	M-FZA
Auspacken	Abdeckung entfernen/öffnen mit Werkzeug	M-ABB M-ABC M-ABD

Elektrik Leistungen montieren	Befestigen in Clip oder Klammer mit Werkzeug	M-LBB
	Befestigen an Lasche mit Verformung mit Werkzeug	M-LBE
	Befestigen von Kabelbinder (nur schließen) mit Werkzeug	M-LBL
	Befestigen von Kabelbinder (befestigen und schließen) mit Werkzeug	M-LBN
	Anschließen von Hülse via Steckklemmverbindung mit Werkzeug	M-LAC

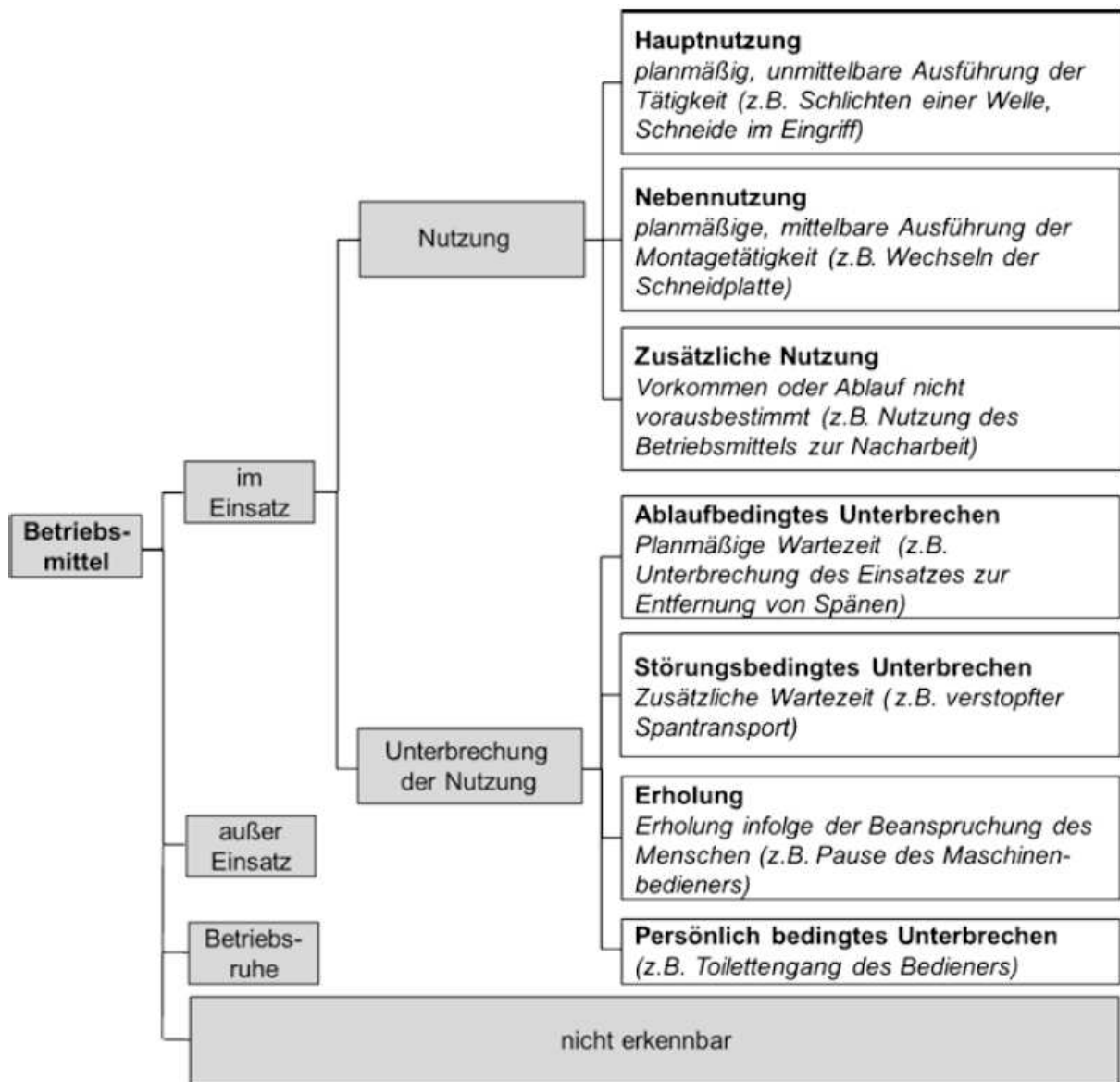


Abbildung 54: Analyse der Nutzung des Betriebsmittels und Einteilung in Ablaufarten [152]

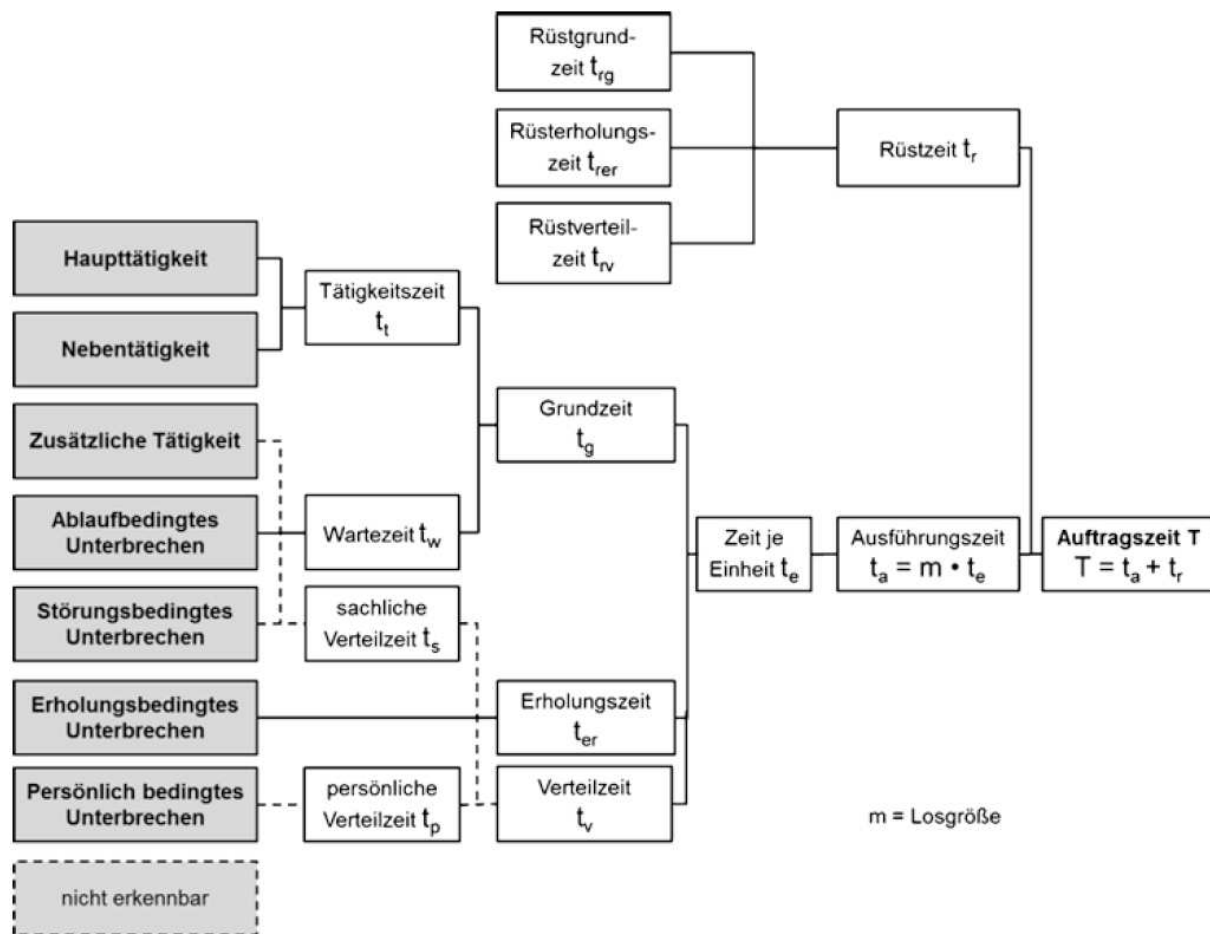


Abbildung 55: Gliederung von Zeitarten und Zuordnung zu Ablaufarten [152]

Tabelle 88: MTM-UAS Analyseinformationen zur Bestimmung der Einlern- und Trainingszeit (eigene Darstellung)

Parameter	Beschreibung der Informationsquelle	Aus MTM-UAS bestimmbar	
		ja	nein
Bezugsleistung: Grenzwert c	Der Grenzwert c entspricht Vorgabezeiten, welche durch Zeitaufnahmen nach REFA oder mittels SvZ, wie MTM bestimmbar sind.	x	-
Entropie der Prozesselemente: H_{UAS}	Bei der Berechnung der Entropie in Bezug auf die Prozesselemente der Tätigkeitsbeschreibung wird zunächst der prozentuelle Anteil eines Prozesselementes bezogen auf alle Prozesselemente der Gesamttätigkeit bestimmt (p_i) und $\log_2(p_i)$ kann ermittelt werden. Als Multiplikation von p_i und $\log_2(p_i)$ kann die Teilentropie zu jedem Prozesselement bestimmt werden. Durch Summation der Teilentropien aller Prozesselemente wird die Gesamt-Entropie H_{UAS} bestimmt.	x	-
Entropie der Bauteile: H_B	Bei der Berechnung der Entropie in Bezug auf die zu verbauenden Bauteile wird zunächst der prozentuelle Anteil eines jeden Bauteils an der Gesamtmenge aller Bauteile bestimmt (p_i) bestimmt und $\log_2(p_i)$ kann ermittelt werden. Als Multiplikation von p_i und $\log_2(p_i)$ kann die Teilentropie zu jedem Bauteil bestimmt werden. Durch Summation der Teilentropien aller Bauteile wird die Gesamt-Entropie H_B bestimmt werden.	x	-

Erfahrung des Montagearbeiters: E_{MONT}	Die spezifische Montageerfahrung des Werkers kann nicht direkt bestimmt werden. Die Methode MTM unterstellt einen durchschnittlich erfahrenen Werker. Auf Basis der Skalierung: keine Erfahrung = 1, wenig Erfahrung = 2, mittlere Erfahrung = 3, viel Erfahrung = 4 kann stets eine mittlere Erfahrung auf Basis der standardisierten MTM-Prozesselemente angenommen werden. Handelt es sich um Arbeitspersonen mit keinen, wenigen oder vielen Erfahrungen, kann eine direkte Informationsableitung aus MTM nicht erfolgen.	(x)	x
Gender: G	Das Geschlecht ist mit 1 = männlich und 2 = weiblich skaliert. Die Information kann nicht aus Informationen der Methode MTM bestimmt werden, da MTM genderneutral definiert ist.	-	x
Art des Arbeitsplans: D	Der Arbeitsplan zur initialisierenden Anlernung des Werkers ist nicht bekannt und ist entsprechend der Skalierung textbasiert = 1, text- und bildbasiert = 2, bildbasiert = 3, filmbasiert = 3 festzulegen.	-	x
Fleishman-Faktor: FF₁	Der Fleishman-Faktor kann aus der Fleishman-Faktor Struktur nach HAMSTER 1980 bestimmt werden.	-	x
Fleishman-Faktor: FF₆	Der Fleishman-Faktor kann aus der Fleishman-Faktor Struktur nach HAMSTER 1980 bestimmt werden.	-	x
Alter: A	Das Alter ist explizit in Jahren anzugeben. Die Information kann nicht aus Informationen der Methode MTM bestimmt werden, da MTM altersneutral definiert ist.	-	x
Akzeptanzniveau: ξ	Für das Akzeptanzniveau muss gelten $\xi > 1$. Es ist kann nicht aus Informationen der Methode MTM bestimmt werden.	-	x

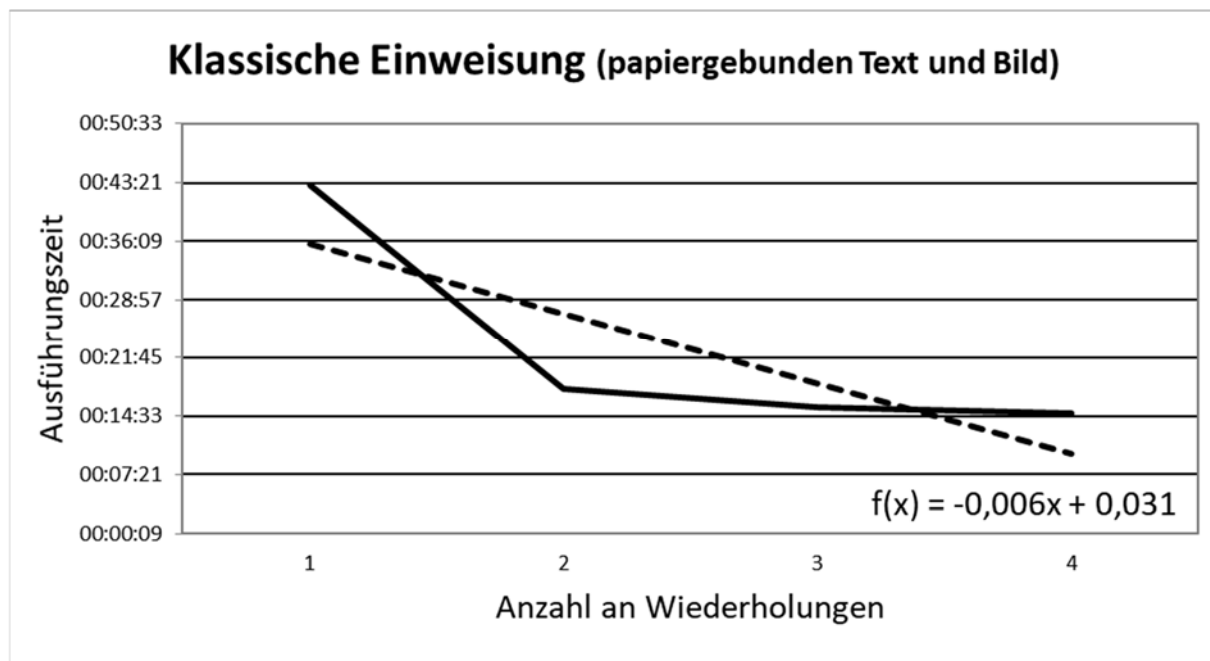


Abbildung 56: Einlern- und Trendkurve bei papiergebundenen Text- und Bildinformationen (eigene Darstellung)

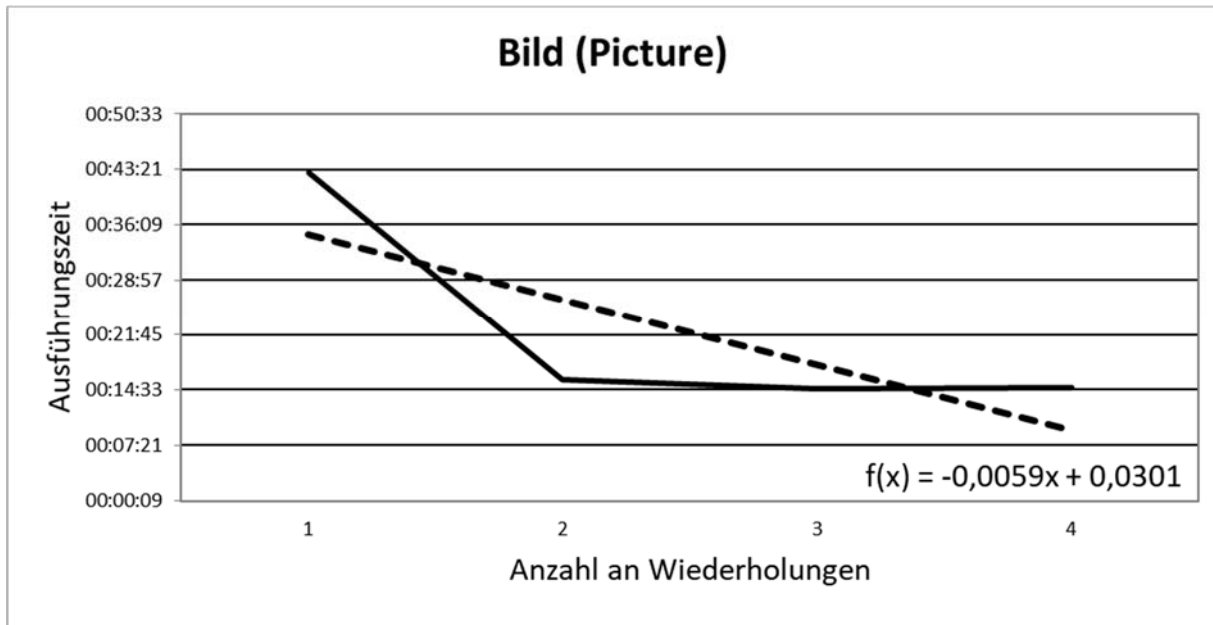


Abbildung 57: Beobachtete Durchführungszeiten bei Informationsrepräsentationsformen Bild (eigene Darstellung)

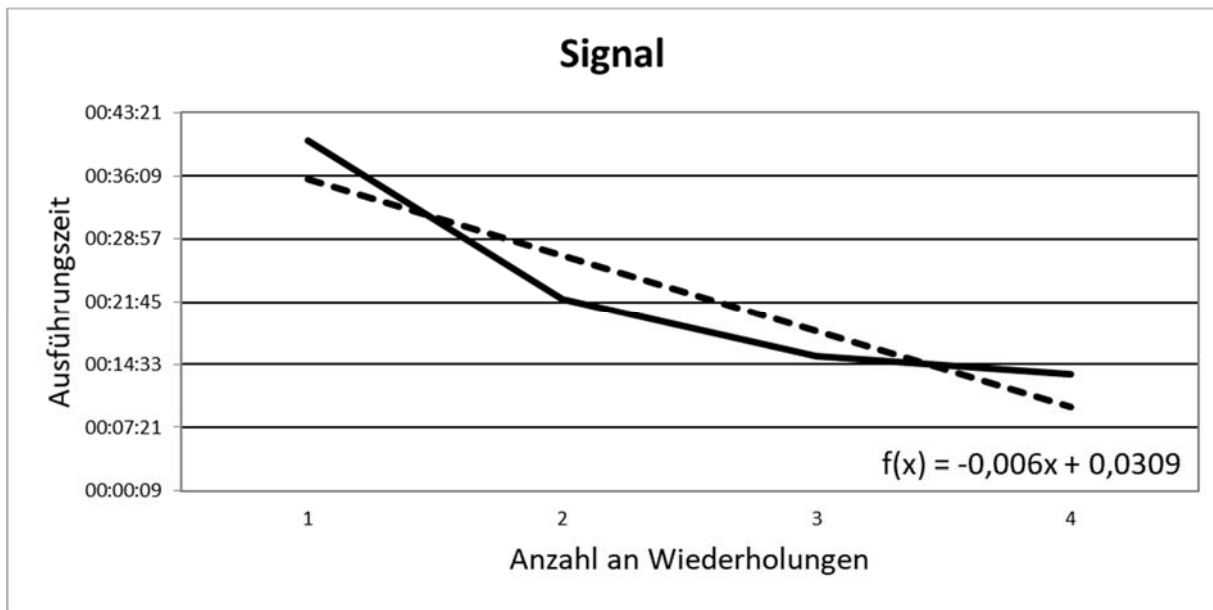


Abbildung 58: Beobachtete Durchführungszeiten bei Informationsrepräsentationsformen Signal (eigene Darstellung)

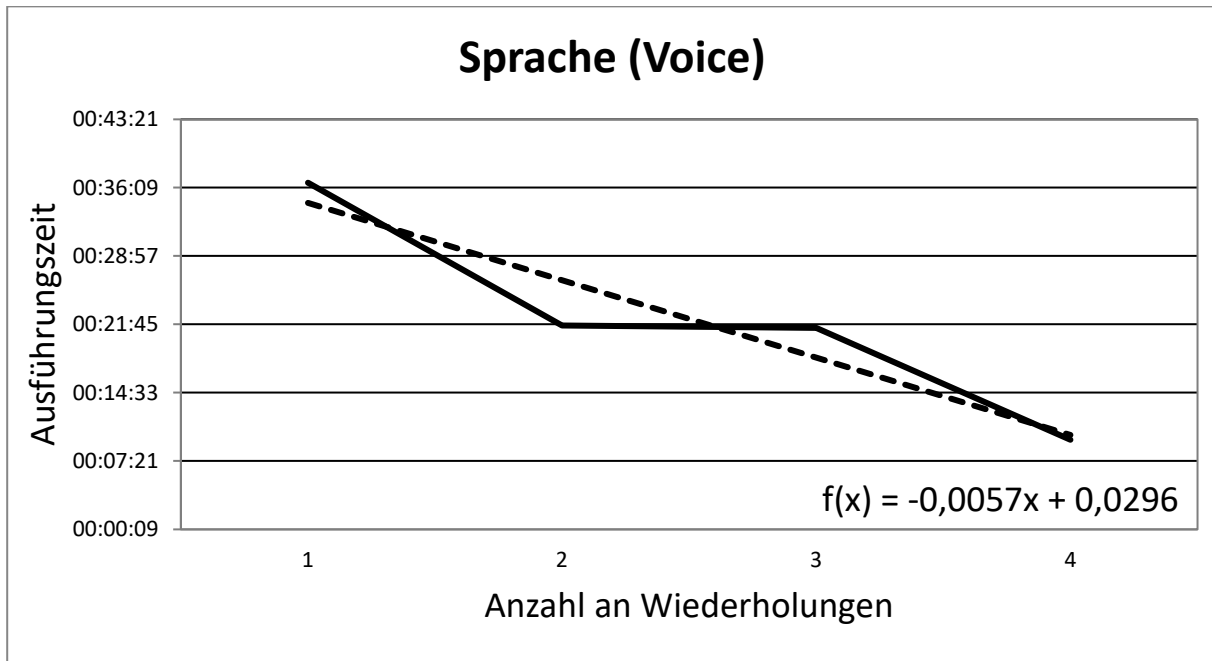


Abbildung 59: Beobachtete Durchführungszeiten bei Informationsrepräsentationsformen Sprache (eigene Darstellung)

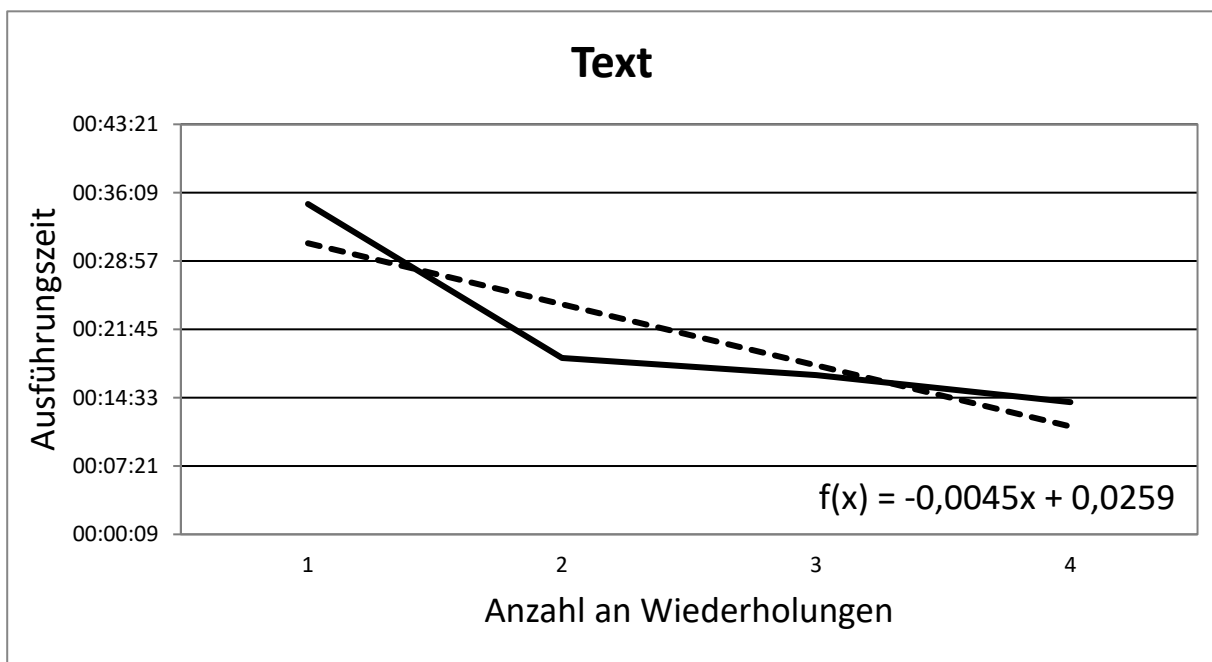


Abbildung 60: Beobachtete Durchführungszeiten bei Informationsrepräsentationsformen Text (eigene Darstellung)

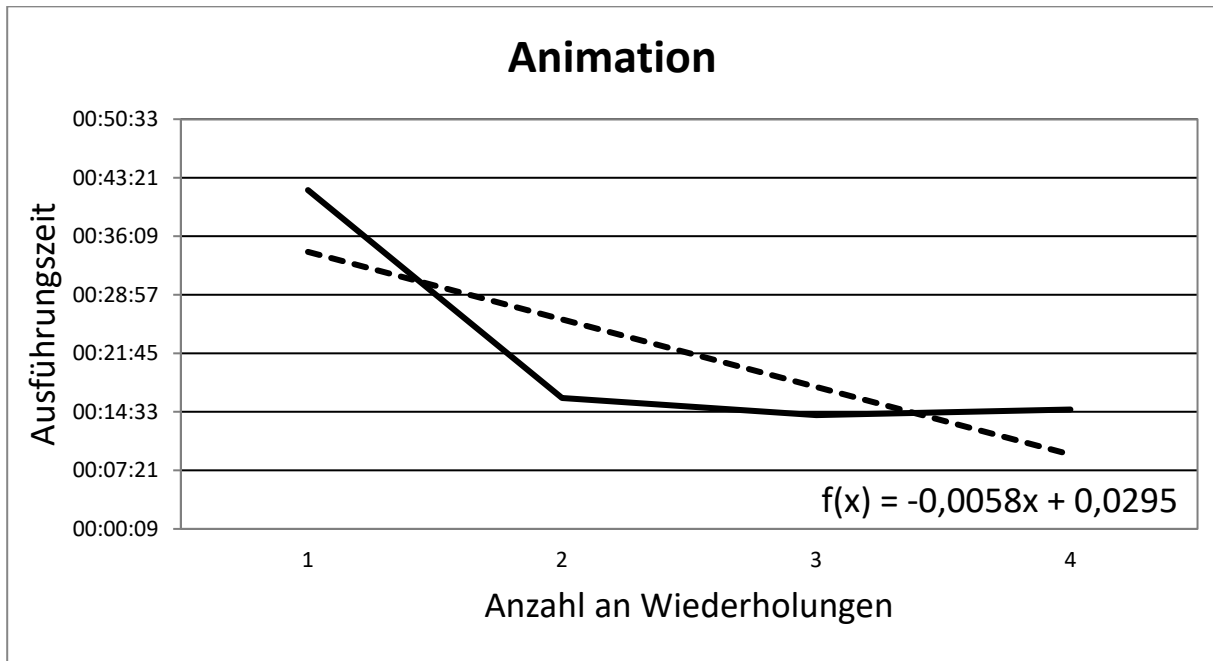


Abbildung 61: Beobachtete Durchführungszeiten bei Informationsrepräsentationsformen Animation (eigene Darstellung)

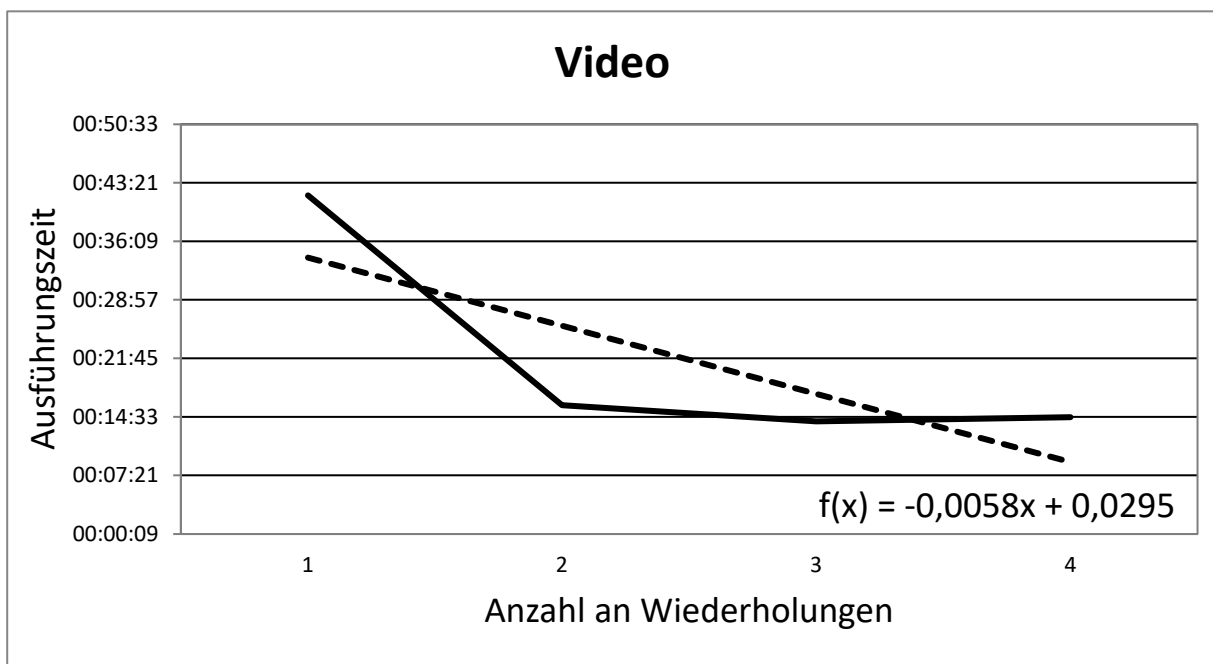


Abbildung 62: Beobachtete Durchführungszeiten bei Informationsrepräsentationsformen Video (eigene Darstellung)

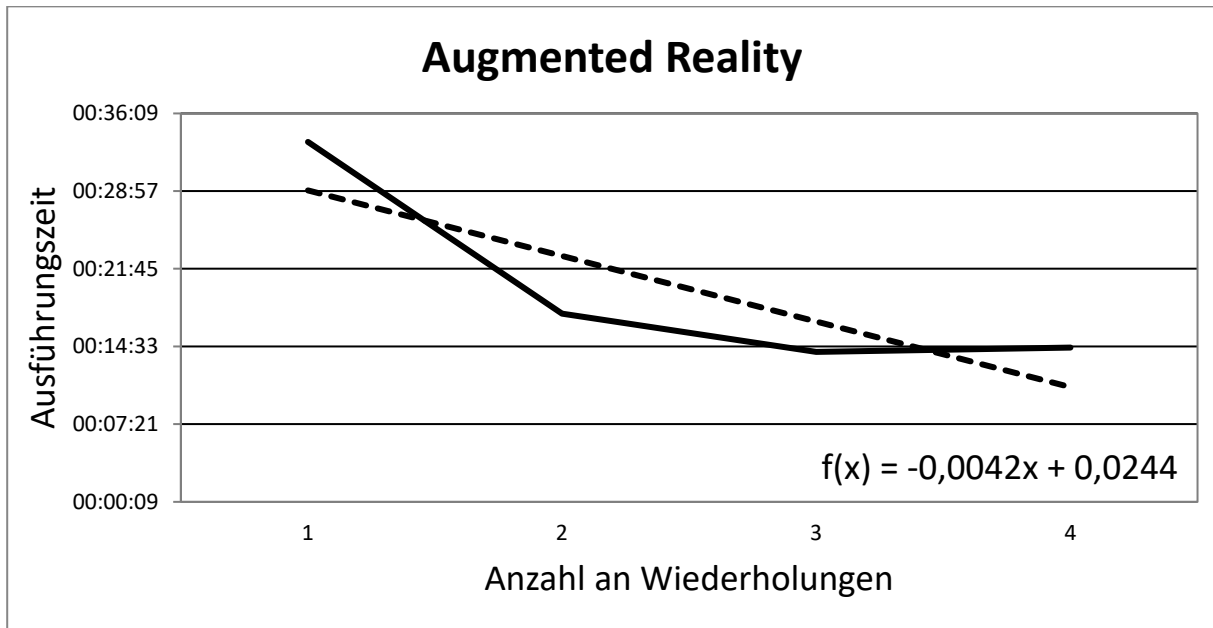


Abbildung 63: Beobachtete Durchführungszeiten bei Informationsrepräsentationsformen Augmented Reality (eigene Darstellung)

Tabelle 89: Vorgehensweise bei einer HRA [169]

Verfahrensschritte	Inhalt
Festlegen des zu bewertenden Systems	
Identifikation und Festlegung von Aufgaben für die Systemkomponente "Mensch"	Beschreibung der zu untersuchenden und zu bewertenden menschlichen Handlungskomplexe; festgelegt werden: <ul style="list-style-type: none"> • Randbedingungen der Analyse • Qualitätsparameter der Analyse • Geltungsbereich der Analyse • Analysetiefe
Qualitative Analyse der Aufgaben	
Informationssammlung	Über die Aufgaben in der zu bewertenden Situation ist Information zu sammeln.
Analyse der zu bewertenden Aufgabe	Auf der Basis der Information sind Handlungsabläufe in Tätigkeitselementen zu zerlegen, die einer qualitativen und quantitativen Bewertung und Repräsentation nach dem gewählten Modell-Ansatz zugänglich sind.
Identifikation möglicher Fehlhandlungen	Die bei der Aufgabenanalyse ermittelten Einzelschritte sind hinsichtlich potenzieller menschlicher Fehlhandlungen auszuwerten.
Identifikation der wirksamen leistungsbeeinflussenden Faktoren (PSF)	Die PSF bilden einen Satz von Modellparametern, die eine graduierte Anpassung der Zuverlässigkeitsparameter der Komponente "Mensch" an die aktuelle Charakteristik des MMS gestatten.

Identifikation von Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur	Die im vorangegangenen Schritt unterstellten Fehlhandlungen können z.B. durch redundante oder diversitäre Maßnahmen oder die System- bzw. Prozesscharakteristik kompensiert werden.
Zusammenfassung der Ergebnisse der Aufgabenanalyse	Die Aufgabenanalyse ist Basis für die nachfolgende quantitative Bewertung. Entsprechend wird das Ergebnis der Aufgabenanalyse in einem Handlungsmodell dokumentiert.
Quantitative Vorhersage	
Quantifizierung der Erfolgs- bzw. Fehlerwahrscheinlichkeiten	Quantifizierung der Nichtverfügbarkeiten der Einzelschritte unter Berücksichtigung der PSF auf Grundlage von modellspezifischen, generischen, empirischen Zuverlässigkeitsdaten oder Expertenschätzwerten; modellgemäße Berechnung der Erfolgs- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit der Handlungskomplexe
Wertung und Dokumentation der Ergebnisse einer HRA	
Wertung und Dokumentation der Ergebnisse	Wichtung der HRA- Ergebnisse in Bezug auf die Funktion des MMS; in Abhängigkeit von der Zielstellung der Analyse iterative Wiederholung der Analyse mit geänderten Parametern

Tabelle 90: Verfahren zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit [170], [171]

Verfahren		Autoren	Kennzeichnung
Expertenbasierte Verfahren	PC: Paired Comparison	COMER ET AL. (1984) [207]	Paarweiser Vergleich von Aufgaben. Aufgrund von Expertenschätzung Ermittlung der Fehlhandlungswahrscheinlichkeit. Durch Kalibrierung mit Aufgaben bekannter Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten wird für alle Aufgaben die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit abgeschätzt.
	SLIM-MAUD: Success-Likelihood Index Methodology	EMBREY ET AL. (1983) [208]	Beurteilung verhaltensbeeinflussender Faktoren mit dem MAUD-Computerprogramm (Multi Attribute Utility Decomposition).
Analytische, modellbasierte Verfahren	HEART Human Error Assessment and Reduction Technique	Williams (1988) [209]	Auf Basis einer Liste mit sehr allgemein beschriebenen Grundaufgaben werden Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten angegeben. Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit gehen als gewichtete Multiplikationsfaktoren in die Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit ein.
	ESAT Experten-System für Aufgabentaxonomie	Brauser (1990) [174]	Berechnung der Fehlhandlungswahrscheinlichkeit unter Einbeziehung von elementaren Einflussfaktoren nach einem vorgegebenen Berechnungsschema.
	MAPPS Maintenance Personal Performance Simulation	Siegel ET AL. (1984) [210]	Zuverlässigkeitsabschätzungen für Wartungsaufgaben durch Simulationstechniken (Monte-Carlo-Methode)

	TESEO Tecnica Empirica Stima Errori Operatori	Bello (1980) [211]	Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer Fehlhandlung bei der Ausführung einer best. Aufgabe durch multiplikative Verknüpfung von elementaren Einflussfaktoren.
	THERP Technique of Human Error Prediction	Swain, Guttmann (1983) [172]	Zuverlässigkeitsberechnung für Aufgaben mit Hilfe von Ereignisbäumen
(Zeit als Haupteinflussfaktor)	HCR Human Cognitive Reliability	Hannaman (1985) [212]	Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit für ein nicht erfolgreiches Reagieren innerhalb eines bestimmten Zeitfensters.
	OAT	Hall ET AL. (1982) [213]	Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit für Diagnose und Entscheidungsaufgaben nach einem Störfall in einem Kernkraftwerk durch ein Zeit-Zuverlässigkeitsmodell.
Unterstützende Verfahren	SAINT System Analysis of Integrated Networks of Tasks	Pritsker (1974) [214]	Verfahren, das im wesentlichen rechnerunterstützte Modellierungsverfahren für die Verknüpfung von Elementen zur Ermittlung von Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten zur Verfügung stellt.
	SHARP Systematic Human Action Reliability Procedure	Hannaman, Spurgin (1984) [215]	Verfahren, das Werkzeuge für eine strukturierte Durchführung einer Zuverlässigkeitsanalyse zur Verfügung stellt.

Tabelle 91: ESAT Standardwörter, Zeiten und Vorgewichte [137]

Standardwörter für Aktivitäten	Zeit t	Vorge- wicht d	Art a	Bedeutung der Standardwörter
Wahrnehmungen (W)				
Lesen, Sehen	0,3...0,6	1...10	W1	visuelle Informationsaufnahme
Hören	1,00	2,00	W2	akustische Informationsaufnahme
Fühlen	2,00	5,00	W3	taktile Informationsaufnahme
Spüren	3,00	7,00	W4	kinästhetische Informationsaufnahme
Überwachen	3,00	10,00	W5	komplexe Informationsaufnahme
Detektion (D)				
Selektiv wahrnehmen	1,00	5,00	D1	ingeübte, erwartete Reize
Suchen und Finden	2,00	6,00	D2	Reizwahrnehmung gegen Hintergrund
Entdecken	3,50	10,00	D3	unbekannte Reize gegen Hintergrund
Mentale Operationen (M)				
Vergleichen	0,1...0,2	5...10	M1	Informationen vergleichen
Merken (Speichern)	0,1...0,2	2...10	M2	Informationen merken (speichern)
Erinnern	0,1...0,2	2...10	M3	Informationen rückrufen
Schätzen	3,00	3,00	M4	Informationen gewichtet vergleichen

Identifizieren	0,1...	6,00	M5	Bedeutung von Informationen erkennen
Rechnen	2,00	4...8	M6	mit numerischen Informationen rechnen
Transformieren	3,00	8,00	M7	Information in andere Form umsetzen
Erkennen	1,00	10,00	M8	komplexe Zusammenhänge ableiten
Zählen	0,3...1,3	2...10	M9	zu entnehmenden Artikel zählen
Entscheidungen (E)				
Wählen, Auswählen	1,00	1...5	E1	z.B. Schalter auswählen
Entscheiden	2,00	6...10	E2	Handlungsbedarf und Form ableiten
Handlungen (H)				
Hinsehen	1,00	1,00	H1	Blicksteuerung, Bewegung
Betätigen	1,0...	2,00	H2	gezielte Hand- und Fußbewegung
Sprechen	1,00	3,00	H3	Informationen aussprechen
Bewegen	2,50	4,00	H4	allgemeine physische Bewegung
Schreiben (Quittieren)	0,80	5,00	H5	Informationen schriftlich abgeben
Eintippen	3,00	6,00	H6	Informationen über "Keyboard" abgeben
Zeichnen	3,50	6...8	H7	Informationen zeichnerisch darstellen
Regeln, Steuern	4,00	9...10	H8	komplexe, manuelle Steuerung
Entnehmen	0,4...1,2	1...2	H9	Artikel aus Lagermittel entnehmen
Ablegen	0,1...2,0	1...2	H10	Artikel in Kommissionierhilfsmittel ablegen
Informationsart (I)				
Ident-Nummer	*	1...10	I	Lagerort, Artikelnummer, Behälterinformation
Route	*	10,00	I	Weg zum Entnahme- oder Ablageort
Ziffer	*	1,00	I	einzelnes Zahlenelement
Buchstabe	*	2,00	I	einzelnes Textelement
Ton (akustisch)	*	5,00	I	hörbarer Ton
Tonfolge, Melodie	*	9...10	I	charakteristische Folge von Tonfrequenzen
...
Bild	*	10,00	I	komplexer Zusammenhang vieler Bildelemente
Entscheidungstypen (ET)				
nächste Unteraufgabe	*	1,00	ET	Gegenpol zur "Wiederholung"
...
Improvisation der Arbeit	*	10,00	ET	Versuch eines neuen Verfahrens
Entscheidungsbedingungen (EB)				
(wenn) falsch	*	1,00	EB	Entscheidung, wenn Ergebnis falsch
...
(wenn) unbekannt	*	10,00	EB	Entscheidung für unbekanntes Konsequenz
Informationsträger (Q)				
Beleg, Etikett, Display	*	1...10	Q	Entnahmeinformation (Lagerort, Stückzahl, etc.)
Infoträger	*	0...10	Q	Lagerort, Behälteridentifikation usw.

Lagermittel	*	1,00	Q	Durchlauf-, Fachboden-, Palettenregal
Artikel	*	1...2	Q	Kleinst- und Kleinartikel, übrige Artikel
Behälter	*	1,00	Q	Kommissionierbehälter
Fahne "Flag"	*	1,00	Q	digitale Zustandsanzeigen 0 oder 1
Lautsprecher / Kopfhörer	*	2,00	Q	akustisches Übertragungssignal
Seite (Buch/Menü)	*	8,00	Q	Fläche mit Text/ Bildeinheiten
...
Außenwelt	*	10,00	Q	Synonym für komplexe Umwelt
Bediengerätetmittel (B)				
Knopf, Taste	*	1,00	B	Druckschalter mit einer Funktion
Schreibstift	*	6,00	B	Bleistift, Kugelschreiber usw.
...
Steuerknüppel, Kraft	*	10,00	B	Gerät mit Krafteinstellung

Tabelle 92: PSF₂ – Aufgabencharakteristik [137]

c ₁	Komplexität	Wird berechnet als				
		$c_1 = m/15$ (für $m < 15$); $c_1 = 1$ (für $m > 15$)				
c ₂	Schwierigkeit	$0 < c_2 = \text{Arithmetisches Mittel der } d_j \leq 1$				
		wobei $d_{ij} = t_{ij} / t_a * d_{ijk}$ ($i = 1, 2, \dots, 5$; $j = 1, 2, \dots, m$)				
c ₃	Korrigierbarkeit	Ist die Korrektur eines Fehlers möglich? (Zeitreserve und/oder technische Möglichkeit zur Korrektur)				
		sicher möglich		möglich		unmöglich
		0	0,25	0,5	0,75	1
c ₄	Ereignistyp	Wie häufig wird die Aufgabe durchgeführt? Ist die Durchführung gewohnt? (Routine)				
		regelmäßig/häufig gewohnt		ab und zu vorhersehbar		selten/sporadisch überraschend
		0	0,25	0,5	0,75	1
c ₅	Risikotyp	Die Folgen einer Fehlhandlung sind				
		ohne Risiko		mäßiges Risiko		katastrophal
		0	0,25	0,5	0,75	1

Tabelle 93: PSF₃ – Personalfaktoren [137]

p ₁	Erfahrung/ Übung	Die Erfahrung des Operateurs bzgl. der Aufgabe ist				
		sehr hoch		mittel		sehr gering
		0	0,25	0,5	0,75	1
p ₂	Aufmerksam- keit/ Wachsam- keit	Die Aufmerksamkeit / Wachsamkeit des Operateurs ist				
		sehr hoch		mittel		sehr gering
		0	0,25	0,5	0,75	1
p ₃	Arbeitstempo/ Reaktionsge- schwindigkeit	Das Arbeitstempo bzw. die Reaktionsgeschwindigkeit des Operateurs ist				
		sehr gering		mittel		sehr hoch
		0	0,25	0,5	0,75	1
p ₄	Motivation	Der Operateur ist in Bezug auf seine Aufgabe				
		hoch motiviert		mäßig motiviert		ablehnend
		0	0,25	0,5	0,75	1

p ₅	Sonstige Faktoren	Dieser Faktor wird allgemein auf 1 gesetzt - das entspricht dem "erfahrenen Normaloperateur"				
		erfahrener Operateur			unerfahrener Operateur	
		0	0,25	0,5	0,75	1

Tabelle 94: PSF₄ – Umweltfaktoren [137]

e ₁	Klimafaktoren	Klimaparameter (Temperatur, Feuchte, Luftdruck) sind				
		ideal/normal	nicht störend			extrem störend
		0	0,25	0,5	0,75	1
e ₂	Beleuchtung	Die Beleuchtungsparameter des Arbeitsplatzes sind				
		ideal/normal	nicht angemessen			sehr schlecht
		0	0,25	0,5	0,75	1
e ₃	Kontamination	Kontaminationen des Arbeitsplatzes (Schmutz, Staub, Gas etc.)				
		keine	erträglich		merkbar	untolerierbar
		0	0,25	0,5	0,75	1
e ₄	Lärm	Akustische Geräusche / Lärmpegel mit Einfluss auf die Arbeit				
		normal < 45 dBA	erträglich		merkbar	gefährlich > 120 dBA
		0	0,25	0,5	0,75	1
e ₅	Vibrationen	Vibrationen/ mechanische Schwingungen sind bei der Arbeit				
		nicht merkbar	merkbar	störend	stark	gefährlich
		0	0,25	0,5	0,75	1
e ₆	Beschleunigungen	Lineare oder rotatorische Schwingungen sind				
		niedrig	mäßig		gerade tolerierbar	untolerierbar
		0	0,25	0,5	0,75	1
e ₇	externe Bedrohungen	Ist mit externen Bedrohungen (Beschuss, Feuergefahr, Glatteis, Sturm etc.) zu rechnen?				
		nein	mit geringer		starker	sehr starker Wahrscheinlichkeit
		0	0,25	0,5	0,75	1

Tabelle 95: PSF₅ – Systemfaktoren [137]

s ₁	Schnittstelle / Werkzeug	Wie beeinflusst die Schnittstelle/ das Werkzeug die Arbeit? (hier sind nur negative Einflüsse berücksichtigt)				
		nicht	wenig	mäßig	stark	sehr stark
		0	0,25	0,5	0,75	1
s ₂	Informationsrückkopplung	Ist ausreichend Information über den Systemzustand vorhanden?				
		ja, immer		nicht ausreichend	sehr wenig	
		0	0,25	0,5	0,75	1
s ₃	Systemsicherheit	Wie ist die Bediensicherheit des Systems?				
		groß		mäßig nicht ausreichend	gefährlich	
		0	0,25	0,5	0,75	1
s ₄	Technische Zuverlässigkeit	Das bediente System (Gerät) ist				
		zuverlässig			unzuverlässig	
		0	0,25	0,5	0,75	1

s ₅	Zeitstress / Zeitbudget	Die vorgegebene Zeitspanne für die Arbeitsausführung				
		mit Reserve		gerade ausreichend		zu kurz
		0	0,25	0,5	0,75	1
s ₆	Arbeitsdauer (Ermüdung)	Durchführung der Arbeitsaufgabe nach einer Arbeitszeit von:				
		<2 Stunden		ca. 4 Stunden		> 6 Stunden
		0	0,25	0,5	0,75	1
s ₇	Arbeits-/ Aufgabenorganisation	Gibt es adäquate Werkzeuge/ Geräte/ Handbücher/ Instruktionen?				
		ja		nicht so wie nötig		unzureichend
		0	0,25	0,5	0,75	1

Tabelle 96: Bestimmbarkeit des Spannungsvektors G aus einer MTM-UAS Analyse (eigene Darstellung)

Spannungsvektor G: $G = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$				
PSF 1 - Aufgabentyp			aus MTM bestimmbar	Anmerkungen
Perzeption	t ₁	$t_1 = (t_{11} + t_{12} + \dots + t_{1j}) / t_a$	nein	Für rein sequenziell durchgeführte Aufgaben (wie es in der Montage üblich ist) gilt für S ₁ : $S_1 = t_1 + t_2 + \dots + t_5 = 1$
Detection	t ₂	$t_2 = (t_{21} + t_{22} + \dots + t_{2j}) / t_a$	nein	
Mentale Verarbeitung	t ₃	$t_3 = (t_{31} + t_{32} + \dots + t_{3j}) / t_a$	nein	
Entscheidung	t ₄	$t_4 = (t_{41} + t_{42} + \dots + t_{4j}) / t_a$	nein	
Handlung	t ₅	$t_5 = (t_{51} + t_{52} + \dots + t_{5j}) / t_a$	nein	
PSF 2 - Aufgabencharakteristik			aus MTM bestimmbar	Anmerkungen
Komplexität	c ₁	c ₁ = m/15 (für m < 15); c ₁ = 1 (für m > 15)	ja	-
Schwierigkeit	c ₂	wobei d _{ij} = t _{ij} / t _a * d _{ijk} (i= 1,2... 5; j=1,2...m)	ja	-
Korrigierbarkeit	c ₃	likert-skaliert (0 – 1)	nein	ließen sich über zusätzliche Informationen in der eBom zum Ausdruck bringen.
Ereignistyp	c ₄	likert-skaliert (0 – 1)	nein	ist über eine Personaleinsatzplanung korrelierend zu erfassen
Risikotyp	c ₅	likert-skaliert (0 – 1)	nein	Ließe sich über eine FMEA Analyse zum Ausdruck bringen
PSF 3 - Personalfaktoren			aus MTM bestimmbar	Anmerkungen
Erfahrung / Übung	p ₁	likert-skaliert (0 – 1)	nein	MTM nimmt hier einen durchschnittlichen Wert an. Individualitäten sind manuell einzugeben.
Aufmerksamkeit	p ₂	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
Arbeitstempo	p ₃	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
Motivation	p ₄	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
Sonstige Faktoren	p ₅	likert-skaliert (0 – 1)	nein	

PSF 4 - Umweltfaktoren			aus MTM bestimmbar	Anmerkungen
Klimafaktoren	e ₁	likert-skaliert (0 – 1)	nein	Gemäß Arbeitsstättenverordnung sind für den Menschen erträgliche Bedingungen zu gewährleisten. Somit ist die Skalierung grundsätzlich mit 0 – 0,25 anzusetzen. Im Ausnahmefall sind die Einstellungen manuell vorzunehmen.
Beleuchtung	e ₂	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
Kontaminationen	e ₃	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
Lärm	e ₄	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
Vibrationen	e ₅	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
Beschleunigung	e ₆	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
externe Bedrohungen	e ₇	likert-skaliert (0 – 1)	nein	
PSF 5 - Systemfaktoren			aus MTM bestimmbar	Anmerkungen
Schnittstelle / Werkzeug	s ₁	likert-skaliert (0 – 1)	nein	sind manuell anzugeben
Informationsrückkopplung	s ₂	likert-skaliert (0 – 1)	nein	sind manuell anzugeben
Systemsicherheit	s ₃	likert-skaliert (0 – 1)	nein	sollte grundsätzlich gewährleistet sein (gemäß Arbeitsstättenverordnung)
Technische Zuverlässigkeit	s ₄	likert-skaliert (0 – 1)	nein	sollte grundsätzlich gewährleistet sein (gemäß Arbeitsstättenverordnung)
Zeitstress / Zeitbudget	s ₅	likert-skaliert (0 – 1)	ja	Über persönliche und sachliche Verteilzeiten
Ausdauer (Ermüdung)	s ₆	likert-skaliert (0 – 1)	nein	ist über eine Personaleinsatzplanung korrelierend zu erfassen
Arbeits- und Aufgabenorganisation	s ₇	likert-skaliert (0 – 1)	nein	Sollte grundsätzlich gewährleistet sein.

Tabelle 97: Inputinformation zur Teile- und Baugruppenkomplexität (Produktkomplexität) nach [123]

Nr.	Produktbauteile und Baugruppen	Symmetrie	Größe	Dicke	Gewicht	Verwirrung	Optische Vergrößerung	Greifen und Manipulieren	AssisAs-sistenz
		C _f	C _f	C _f	C _f	C _f	C _f	C _f	C _f
1	Verpackung 1	0,70	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	0,91	0,75
2	ISO 4032 - M3	0,70	0,81	0,27	0,50	0,58	0,80	0,91	0,75
3	Bodenplatte	0,70	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	0,91	0,75
4	Kabinenbaugruppe 1	0,84	0,74	0,27	0,50	1,00	0,80	1,00	0,34
5	ISO 14579-TX-M3x15	0,70	0,74	0,27	0,50	1,00	0,80	1,00	0,34
6	Ladefläche 1	0,94	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	1,00	0,34
7	Achsrohr	0,70	0,74	0,27	0,50	1,00	0,80	1,00	0,34
8	Achse	0,70	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	1,00	0,75
9	Reifen 1	0,70	0,74	0,27	0,50	1,00	0,80	1,00	0,34
10	DIN 1587 - M3	0,70	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	0,91	0,75
11	Verpackung 2	0,84	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	0,91	0,75
12	Ladefläche 2	0,84	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	0,91	0,75
13	Reifen 2	0,84	0,74	0,27	0,50	1,00	0,80	1,00	0,34
14	Verpackung 3	0,94	0,74	0,27	0,50	1,00	0,80	1,00	0,34
15	Ladefläche 3	0,94	0,74	0,27	0,50	1,00	0,80	1,00	0,34
16	Reifen 3	0,94	0,74	0,27	0,50	0,58	0,80	0,91	0,75
Nr.	Produktbauteile und Baugruppen	Niederhalten	Ausrichtung	Widerstand	Erreichbarkeit	Mechanisches Befestigungsverfahren	Kein Mechanisches Befestigungsverfahren	Nicht befestigungstechnischer Prozess	
		C _f	C _f	C _f	C _f	C _f	C _f	C _f	
1	Verpackung 1	0,54	0,86	0,87	0,57	0,42	0,00	0,00	
2	ISO 4032 - M3	0,54	0,86	0,87	0,57	0,42	0,00	0,00	
3	Bodenplatte	0,54	0,86	0,87	0,57	0,42	0,00	0,00	
4	Kabinenbaugruppe 1	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
5	ISO 14579-TX-M3x15	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
6	Ladefläche 1	0,54	0,86	0,87	0,81	0,42	0,00	0,00	
7	Achsrohr	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
8	Achse	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
9	Reifen 1	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
10	DIN 1587 - M3	0,54	1,00	0,87	0,81	0,42	0,00	0,00	
11	Verpackung 2	0,54	1,00	0,87	0,81	0,42	0,00	0,00	
12	Ladefläche 2	0,54	1,00	0,87	0,81	0,42	0,00	0,00	
13	Reifen 2	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
14	Verpackung 3	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
15	Ladefläche 3	0,54	0,86	1,00	0,81	0,42	0,00	0,00	
16	Reifen 3	0,54	1,00	0,87	0,81	0,42	0,00	0,00	

Tabelle 98: Informationen zu den Performance Shape Faktors (eigene Darstellung) nach [137]

Performance Shape Factor 1		S1	1
t ₁	Perzeption		1
t ₂	Detektion		
t ₃	Mentale Verarbeitung		
t ₄	Entscheidung		
t ₅	Handlung		
Performance Shape Factor 2		S2	1
c ₁	Komplexität		1
c ₂	Schwierigkeit		0,78
c ₃	Korrigierbarkeit		0,5
c ₄	Ereignistyp		0,5
c ₅	Risikotyp		0,5
Performance Shape Factor 3		S3	3,75
p ₁	Erfahrung/ Übung		1
p ₂	Aufmerksamkeit/ Wachsamkeit		1
p ₃	Arbeitstempo/ Reaktionsgeschwindigkeit		0,5
p ₄	Motivation		0,5
p ₅	Sonstige Faktoren		0,75
Performance Shape Factor 4		S4	0
e ₁	Klimafaktoren		0
e ₂	Beleuchtung		0
e ₃	Kontamination		0
e ₄	Lärm		0
e ₅	Vibrationen		0
e ₆	Beschleunigungen		0
e ₇	externe Bedrohungen		0
Performance Shape Factor 5		S5	0
s ₁	Schnittstelle / Werkzeug		0
s ₂	Informationsrückkopplung		0
s ₃	Systemsicherheit		0
s ₄	Technische Zuverlässigkeit		0
s ₅	Zeitstress / Zeitbudget		0
s ₆	Arbeitsdauer (Ermüdung)		0
s ₇	Arbeits-/ Aufgabenorganisation		0

In der folgenden Tabelle werden die Komponenten des dargestellten T-Pools im Hinblick auf deren Einfluss auf die Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit, sowie auf deren Einflüsse und Auswirkungen auf den Investitions- und Implementierungsaufwand dargestellt. Die Daten basieren dabei auf Erfahrungswerten, welche im Zuge des Projektes „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ im Rahmen der Beschaffung, des Aufbaues sowie im Rahmen der Implementierung und Inbetriebnahme gesammelt worden sind.

Tabelle 99: Beschreibung der Komponenten des T-Pools (eigene Darstellung)

T ₁	Komponenten im Technologie-Pool T			Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Implementierungsaufwand
	Schraubarbeiten	Bezeichnung der Komponenten			
Anzahl Tätigkeitsschritte „Schraubarbeiten“	0	Bezugsgröße (Multiplikator)	Einfluss auf die Ausführungszeit	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl Tätigkeitsschritte „Schraubarbeiten“	0	Bezugsgröße (Multiplikator)	Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit	Software (fixe Anteile)	Bezugsgröße (Multiplikator) für variablen Aufwand
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl Tätigkeitsschritte „Schraubarbeiten“	0	Bezugsgröße (Multiplikator)	Einfluss auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit	Hardware (fixe Anteile)	Durchschnittliche variable Soft- und Hardware
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl Tätigkeitsschritte „Schraubarbeiten“	0 %	Bezugsgröße (Multiplikator)	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl Tätigkeitsschritte „Schraubarbeiten“	100%	Bezugsgröße (Multiplikator)	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl unterschiedlicher Schraubsysteme pro Arbeitsplatz	2000,00 € pro System	Bezugsgröße (Multiplikator)	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl unterschiedlicher Schraubsysteme pro Arbeitsplatz	2000,00 € pro System	Bezugsgröße (Multiplikator)	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl Arbeitsplätze	150,00 € pro Arbeitsplatz	Bezugsgröße (Multiplikator)	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl unterschiedlicher Schraubsysteme pro Arbeitsplatz	8 Stunden	Bezugsgröße (Multiplikator)	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			
Anzahl unterschiedlicher Schraubsysteme pro Arbeitsplatz	4 Stunden	Bezugsgröße (Multiplikator)	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
		Zunahme			
		Abnahme			

T ₅	T ₄	T ₃	T ₂
Behandlungsarbeiten	Einspann- und Ausspannarbeiten	Markierungsarbeiten	Prüf- und Messarbeiten
Anzahl Tätigkeitsschritte „Behandlungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Einspann- und Ausspannarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Markierungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Prüf- und Messarbeiten“
0	0	0	0
0	0	0	0
Anzahl Tätigkeitsschritte „Behandlungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Einspann- und Ausspannarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Markierungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Prüf- und Messarbeiten“
0	0	0	0
0	0	0	0
Anzahl Tätigkeitsschritte „Behandlungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Einspann- und Ausspannarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Markierungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Prüf- und Messarbeiten“
0	0	0	0 %
100%	100%	100%	100%
Anzahl unterschiedlicher Behandlungssysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Ein- und Ausspannsysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Markierungssysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Prüf- und Messsysteme pro Arbeitsplatz
2000,00 € pro System	2000,00 € pro System	2000,00 € pro System	2000,00 € pro System
2000,00 € pro System	2000,00 € pro System	2000,00 € pro System	2000,00 € pro System
Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze
150,00 € pro Arbeitsplatz	150,00 € pro Arbeitsplatz	150,00 € pro Arbeitsplatz	150,00 € pro Arbeitsplatz
Anzahl unterschiedlicher Behandlungssysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Ein- und Ausspannsysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Markierungssysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Prüf- und Messsysteme pro Arbeitsplatz
8 Stunden	8 Stunden	8 Stunden	8 Stunden
4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden

T ₉	T ₈	T ₇	T ₆
Verpackungsarbeiten	Diverse Halbautomaten	Klebearbeiten	Kollaborative Robotikarbeiten
Anzahl Tätigkeitsschritte „Verpackungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte an einem Halbautomaten	Anzahl Tätigkeitsschritte „Klebearbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Kollaborative Robotikarbeiten“
0	0	0	0
0	0	0	0
Anzahl Tätigkeitsschritte „Verpackungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte an einem Halbautomaten	Anzahl Tätigkeitsschritte „Klebearbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Kollaborative Robotikarbeiten“
0	0	0	0
0	0	0	0
Anzahl Tätigkeitsschritte „Verpackungsarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte an einem Halbautomaten	Anzahl Tätigkeitsschritte „Klebearbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Kollaborative Robotikarbeiten“
0	0	0	0
100%	100%	100%	100%
Anzahl unterschiedlicher Verpackungssysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Halbautomaten pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Klebesysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Robotiksysteme pro Arbeitsplatz
2000,00 € pro System	500,00 € pro System	2000,00 € pro System	500,00 € pro System
2000,00 € pro System	wird als vorhanden angenommen	2000,00 € pro System	wird als vorhanden angenommen
Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze
150,00 € pro Arbeitsplatz	150,00 € pro Arbeitsplatz	150,00 € pro Arbeitsplatz	150,00 € pro Arbeitsplatz
Anzahl unterschiedlicher Verpackungssysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Halbautomaten pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Klebesysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Robotiksysteme pro Arbeitsplatz
8 Stunden	8 Stunden	8 Stunden	8 Stunden
4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden

T ₁₁	T ₁₀
Normteilemontierarbeiten	Leitungenmontierarbeiten
Anzahl Tätigkeitsschritte „Normteilemontierarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Leitungenmontierarbeiten“
0	0
0	0
Anzahl Tätigkeitsschritte „Normteilemontierarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Leitungenmontierarbeiten“
0	0
0	0
Anzahl Tätigkeitsschritte „Normteilemontierarbeiten“	Anzahl Tätigkeitsschritte „Leitungenmontierarbeiten“
0	0
100%	100%
Anzahl unterschiedlicher Normteilmontiersysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Leitungsmontiersysteme pro Arbeitsplatz
2000,00 € pro System	2000,00 € pro System
2000,00 € pro System	2000,00 € pro System
Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze
150,00 € pro Arbeitsplatz	150,00 € pro Arbeitsplatz
Anzahl unterschiedlicher Normteilmontiersysteme pro Arbeitsplatz	Anzahl unterschiedlicher Leitungsmontiersysteme pro Arbeitsplatz
8 Stunden	8 Stunden
4 Stunden	4 Stunden

In der folgenden Tabelle werden die Komponenten des dargestellten D-Pools im Hinblick auf deren Einfluss auf die Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit, sowie auf deren Einflüsse und Auswirkungen auf den Investitions- und Implementierungsaufwand dargestellt. Die Daten basieren dabei auf Erfahrungswerten, welche im Zuge des Projektes „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ im Rahmen der Beschaffung, des Aufbaues sowie im Rahmen der Implementierung und Inbetriebnahme gesammelt worden sind.

Tabelle 100: Beschreibung der Komponenten des D-Pools (eigene Darstellung)

D ₂	D ₁	Komponenten im Technologie-Pool D		
		Bezeichnung der Komponenten		
Touch Screen	Screen	Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz	Einfluss auf die Ausführungszeit	Bezugsgröße (Multiplikator)
				Zunahme
				Abnahme
1,44 Seconds	1,62 Seconds	-	Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)
0,00 Seconds	0,00 Seconds	-	Zunahme	Zunahme
-	-	-	Abnahme	Abnahme
-	-	-	Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)
-	-	-	Zunahme	Zunahme
-	-	-	Abnahme	Abnahme
Anzahl Informationssysteme =1	Anzahl Informationssysteme = 1	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Einfluss auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit	
0,00 EUR	0,00 EUR	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Bezugsgröße (Multiplikator)	
0,00 EUR	0,00 EUR	Software (fixe Anteile)	Zunahme	
Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz	Hardware (fixe Anteile)	Abnahme	
500,00 EUR	250,00 EUR	Bezugsgröße (Multiplikator) für variable Investitionen	Bezugsgröße (Multiplikator)	
0,00 Stunden	0,00 Stunden	Durchschnittliche variable Soft- und Hardware	Zunahme	
Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)	Abnahme	
0,20 Stunden	0,20 Stunden	Bezugsgröße (Multiplikator) für variablen Aufwand	Bezugsgröße (Multiplikator)	
		Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (variabler Anteil)	Zunahme	

D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃
Sprache (Guided by Voice)	Light (Guided by Light)	Projektion	Glass	Tablet (Hand Data Terminal)
Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz	Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz	Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz	Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz	Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz
3,00 Seconds	0,36 Seconds	0,36 Seconds	3,42 Seconds	1,62 Seconds
0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1
5.000,00 EUR	5.000,00 EUR	5.000,00 EUR	0,00 EUR	0,00 EUR
2.000,00 EUR	0,00 EUR	2.000,00 EUR	0,00 EUR	0,00 EUR
Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Material	Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz
150,00 EUR	80,00 EUR	1.200,00 EUR	1.700,00 EUR	700,00 EUR
8,00 Stunden	8,00 Stunden	8,00 Stunden	0,00 Stunden	0,00 Stunden
Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Material	Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz
0,20 Stunden	0,15 Stunden	0,20 Stunden	0,20 Stunden	0,20 Stunden

D ₉	D ₈
Signal	Laser (Guided by Laser)
Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz	Anzahl Tätigkeitsschritte / Anzahl Tätigkeitssequenz
1,62 Seconds	1,62 Seconds
0,00 Seconds	0,00 Seconds
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1
250,00 EUR	5.000,00 EUR
1.850,00 EUR	2.000,00 EUR
Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz
0,00 EUR	1.200,00 EUR
8,00 Stunden	8,00 Stunden
Anzahl Arbeitsplatz	Anzahl Arbeitsplatz
0,20 Stunden	0,20 Stunden

In der folgenden Tabelle werden die Komponenten des dargestellten TS-Pools im Hinblick auf deren Einfluss auf die Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit, sowie auf deren Einflüsse und Auswirkungen auf den Investitions- und Implementierungsaufwand dargestellt. Die Daten basieren dabei auf Erfahrungswerten, welche im Zuge des Projektes „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ im Rahmen der Beschaffung, des Aufbaues sowie im Rahmen der Implementierung und Inbetriebnahme gesammelt worden sind.

Tabelle 101: Beschreibung der Komponenten des TS-Pools (eigene Darstellung)

TS ₂	TS ₁	Komponenten im Technologie-Pool TS		
		Bezeichnung der Komponenten		
Aufgaben-Detektion mittels Button (manuell)	Aufgaben-Detektion mittels Sprache	Anzahl Tätigkeiten	Einfluss auf die Ausführungszeit	Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit
			Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)
			Zunahme	Zunahme
1,44 Seconds	2,99 Seconds			
0,00 Seconds	0,00 Seconds			
-	-			
-	-			
-	-			
Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Einfluss auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten
			Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)
			Zunahme	Zunahme
0,00 %	0,00 %			
60,00%	80,00%			
Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Implementierungsaufwand
			Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
			Software (fixe Anteile)	Bezugsgröße (Multiplikator) für variablen Aufwand
			Hardware (fixe Anteile)	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (variabler Anteil)
			Bezugsgröße (Multiplikator) für variable Investitionen	
10,00 EUR	150,00 EUR			
4 Stunden	4 Stunden			
Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Implementierungsaufwand
			Bezugsgröße (Multiplikator) für variable Investitionen	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (variabler Anteil)
0,00 EUR	2.000,00 EUR			
2.000,00 EUR	2.000,00 EUR			
10,00 EUR	150,00 EUR			
4 Stunden	4 Stunden			
4 Stunden	4 Stunden			

TS ₇	TS ₆	TS ₅	TS ₄	TS ₃
Aufgaben-Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	Aufgaben-Detektion mittels RFID (automatisch)	Aufgaben-Detektion mittels RFID (manuell)	Aufgaben-Detektion mittels Nährungssensor	Aufgaben-Detektion mittels Scanner (manuell)
Anzahl Personen	Anzahl Materialaufnahmen	Anzahl Materialaufnahmen	Anzahl Materialplatzieren	Anzahl Materialaufnahmen
0,00 Seconds	0,00 Seconds	2,88 Seconds	0,00 Seconds	2,88 Seconds
0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit
0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
100,00%	80,00%	75,00%	80,00%	75,00%
Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1
10.000,00 EUR	0,00 EUR	0,00 EUR	0,00 EUR	0,00 EUR
2.000,00 EUR	2.000,00 EUR	2.000,00 EUR	2.000,00 EUR	2.000,00 EUR
Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Materialgruppen	Anzahl Arbeitsplätze
900,00 EUR	25,00 EUR	25,00 EUR	5,00 EUR	25,00 EUR
4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden
Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Materialgruppen	Anzahl Materialgruppen	Anzahl Materialgruppen	Anzahl Materialgruppen
4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden

TS ₁₂	TS ₁₁	TS ₁₀	TS ₉	TS ₈
Aufgaben-Detektion mittels (Material in KLT)	Aufgaben-Detektion mittels Kamera (Material Behälter)	Aufgaben-Detektion mittels Kamera	Aufgaben-Detektion mittels PLC / Logdaten	Aufgaben-Detektion mittels Werkzeug-Local-Posit.-Sensor
Anzahl Material	Anzahl Material	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Werkzeuge	Anzahl Werkzeuge
0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds
0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds	0,00 Seconds
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit mit Werkzeugen	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit mit Werkzeugen
0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
75,00%	75,00%	100,00%	0,00% (in T-Pool beinhaltet)	100,00%
Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1	Anzahl Informationssysteme = 1
5.000,00 EUR	5.000,00 EUR	2.500,00 EUR	5.000,00 EUR	10.000,00 EUR
0,00 EUR	0,00 EUR	3.000,00 EUR	700,00 EUR	2.000,00 EUR
Anzahl Materialgruppen	Anzahl Materialgruppen	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Werkzeuge	Anzahl Werkzeuge
80,00 EUR	80,00 EUR	0,00 EUR	0,00 EUR	400,00 EUR
4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden	4 Stunden
Anzahl Materialgruppen	Anzahl Materialgruppen	Anzahl Arbeitsplätze	Anzahl Werkzeuge	Anzahl Werkzeuge
0,50 Stunden	0,50 Stunden	3 Stunden	8 Stunden	4 Stunden

In der folgenden Tabelle werden die Komponenten des dargestellten IR-Pools im Hinblick auf deren Einfluss auf die Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit, sowie auf deren Einflüsse und Auswirkungen auf den Investitions- und Implementierungsaufwand dargestellt. Die Daten basieren dabei auf Erfahrungswerten, welche im Zuge des Projektes „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ im Rahmen der Beschaffung, des Aufbaues sowie im Rahmen der Implementierung und Inbetriebnahme gesammelt worden sind.

Tabelle 102: Beschreibung der Komponenten des IR-Pools (eigene Darstellung)

IR ₂	IR ₁	Komponenten im Technologie-Pool IR			Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Implementierungsaufwand
		Bezeichnung der Komponenten				
Text	Signal (binär)	Anzahl Tätigkeiten	2,50 Seconds	-	Einfluss auf die Ausführungszeit	Bezugsgröße (Multiplikator)
						Zunahme
						Abnahme
Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	0,00 %	8,00 %	-	Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit	Bezugsgröße (Multiplikator)
						Zunahme
						Abnahme
-	-	-	-	-	Einfluss auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit	Bezugsgröße (Multiplikator)
						Zunahme
						Abnahme
In II-Pool berücksichtigt	In II-Pool berücksichtigt	-	-	-	Investitionsaufwand in Soft- und Hardwarekomponenten	Bezugsgröße (Multiplikator) für fixe Investitionen
						Software (fixe Anteile)
						Hardware (fixe Anteile)
						Bezugsgröße (Multiplikator) für variable Investitionen
						Durchschnittliche variable Soft- und Hardware
0,00 Stunden	0,00 Stunden				Implementierungsaufwand	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)
Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten			Bezugsgröße (Multiplikator) für variablen Aufwand		
0,10 Stunden	0,10 Stunden			Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (variabler Anteil)		

IR7	IR6	IR5	IR4	IR3
Interaktionssignal (Trigger)	Augmented Reality	Sprache	Animation / Video	Bild
Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten
0,00 Seconds	3,00 Seconds	3,00 Seconds	2,00 Seconds	2,00 Seconds
-	-	-	-	-
Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit	Manuelle Tätigkeitsausführungszeit
0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
0,00 % (in I-Pool berücksichtigt)	12,00%	7,00 %	6,00 %	4,00 %
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
In II-Pool berücksichtigt	In II-Pool berücksichtigt	In II-Pool berücksichtigt	In II-Pool berücksichtigt	In II-Pool berücksichtigt
0,00 Stunden	0,00 Stunden	0,00 Stunden	0,00 Stunden	0,00 Stunden
Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten	Anzahl Tätigkeiten
0,50 Stunden	0,15 Stunden	0,10 Stunden	0,10 Stunden	0,10 Stunden

II ₃	Data-Driven	-	-	-	-	-	-	-	It is assumed that corresponding hardware and software systems are available in the company.
								0,00 Stunden	
								Anzahl Schnittstellen	
								40,00 Stunden	

In der folgenden Tabelle werden die Komponenten des dargestellten IP-Pools im Hinblick auf deren Einfluss auf die Ausführungszeit, Einlern- und Trainingszeit, sowie auf deren Einflüsse und Auswirkungen auf den Investitions- und Implementierungsaufwand dargestellt. Die Daten basieren dabei auf Erfahrungswerten, welche im Zuge des Projektes „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ im Rahmen der Beschaffung, des Aufbaues sowie im Rahmen der Implementierung und Inbetriebnahme gesammelt worden sind.

Tabelle 104: Beschreibung der Komponenten des IP-Pools (eigene Darstellung)

IP ₁	Komponenten im Technologie-Pool IP			Einfluss auf die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit	Investitionsaufwand in Software- und Hardwarekomponenten	Implementierungsaufwand			
	Bezeichnung der Komponenten	Einfluss auf die Ausführungszeit	Einfluss auf die Einlern- und Trainingszeit			Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (fixer Anteil)	Bezugsgröße (Multiplikator) für variablen Aufwand	Durchschnittlicher Aufwand in Stunden (variabler Anteil)	
TRL 8-9		Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)	Anzahl Digitaler Assistenzsysteme = 1	5.000,00 EUR	16,00 Stunden	-	-
		Zunahme	Zunahme	Zunahme					
		Abnahme	Abnahme	Abnahme					
		Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)					
		Zunahme	Zunahme	Zunahme					
		Abnahme	Abnahme	Abnahme					
		Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)	Bezugsgröße (Multiplikator)					
		Zunahme	Zunahme	Zunahme					
		Abnahme	Abnahme	Abnahme					
		In Abhängigkeit des TRLs	In Abhängigkeit des TRLs	In Abhängigkeit des TRLs					
		In Abhängigkeit des TRLs sind mit Entwicklungs- bzw. Customing Aufwänden zu rechnen	In Abhängigkeit des TRLs sind mit Entwicklungs- bzw. Customing Aufwänden zu rechnen	In Abhängigkeit des TRLs sind mit Entwicklungs- bzw. Customing Aufwänden zu rechnen					

IP₂	TRL 5-7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Anzahl Digitaler Assistenzsysteme = 1	15.000,00	16,00 Stunden	-	-
IP₃	TRL 1-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Anzahl Digitaler Assistenzsysteme = 1	50.000,00 EUR	16,00 Stunden	-	-

Tabelle 105: Erweiterte MTM-UAS Analyse am Beispiel eines Spielzeug LKWs (eigene Darstellung)

lft. Nr.	Montagearbeitsplatz (AP)	Tätigkeits-Beschreibung	MTM-Kode	TMU	AxH	Gesamt TMU	Se-kunden	Material / Bau-gruppe	Materi-alent-nahme & -ver-bau-ung	Werk-zeug
1	AP1	Gehen von Arbeitsplatz zu Supermarkt	KA	25	8,00	200,00	7,20			
2	AP1	Verpackung aufnehmen (ablegen am Arbeitsplatz)	AB3	60	1,00	60,00	2,16	Verpackung 1/2/3	KIT	
3	AP1	Gehen zurück zum Arbeitsplatz	KA	25	8,00	200,00	7,20			
4	AP1	Setzen / Aufstehen	KC	1	1,00	1,00	0,04			
5	AP1	Handvoll Muttern in Hand aufnehmen	AG2	65	1,00	65,00	2,34	ISO 4032 - M3	KLT	
6	AP1	Mutter aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF1	40	4,00	160,00	5,76			
7	AP1	Restliche Muttern zurücklegen	AA2	35	1,00	35,00	1,26			
8	AP1	Bodenplatte aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1,00	65,00	2,34	Bodenplatte	KLT	
9	AP1	Bodenplatte auf Vorrichtung justieren	PC1	30	1,00	30,00	1,08			
10	AP1	Kabinebaugruppe aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1,00	65,00	2,34			
11	AP1	Kabinebaugruppe auf Vorrichtung nachjustieren	PC1	30	1,00	30,00	1,08	Kabinebaugruppe 1/2/3	KLT	
12	AP1	Schraube 1 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1,00	85,00	3,06	ISO 14579 - TX - M3 x 15	KLT	
13	AP1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1,00	60,00	2,16			Maschinenschrauber

14	AP1	Schraube 2 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1,00	85,00	3,06	ISO 14579 - TX - M3 x 15	KLT	
15	AP1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1,00	60,00	2,16			Maschinenschrauber
16	AP1	Ladefläche aufnehmen und positionieren	AF2	65	1,00	65,00	2,34	Ladefläche 1/2/3	KLT	
17	AP1	Ladefläche auf Vorrichtung justieren	PC1	30	1,00	30,00	1,08			
18	AP1	Schraube 3 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1,00	85,00	3,06	ISO 14579 - TX - M3 x 15	KLT	
19	AP1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1,00	60,00	2,16			Maschinenschrauber
20	AP1	Schraube 4 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1,00	85,00	3,06	ISO 14579 - TX - M3 x 15	KLT	
21	AP1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1,00	60,00	2,16			Maschinenschrauber
22	AP1	Objekt aus Vorrichtung aufnehmen und in Hand positionieren	AD1	20	1,00	20,00	0,72			
23	AP1	Objekt auf Arbeitsplatz 2 übergeben	AA3	50	1,00	50,00	1,80			
24	AP2	Objekt aufnehmen und in Vorrichtung platzieren	AA2	35	1,00	35,00	1,26			
25	AP2	Achsrohr 1 aufnehmen	AB2	45	1,00	45,00	1,62	Achsrohr	KLT	
26	AP2	Achse 1 aufnehmen	AB1	30	1,00	30,00	1,08	Achse	KLT	
27	AP2	Achsrohr 1 an hinterer Achsvorrichtung positionieren Stelle A (innen)	AF1	40	1,00	40,00	1,44			
28	AP2	Achse 1 an hinterer Achsvorrichtung positionieren Stelle A (vorne)	AF1	40	1,00	40,00	1,44			
29	AP2	Achse 1 durch Achsrohr 1 durchschieben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
30	AP2	Achse 1 und Achsrohr 1 an hinterer Achsvorrichtung Stelle B Positionieren	AF1	40	1,00	40,00	1,44			
31	AP2	Achse 1 durch Achsrohr 1 weiter durchschieben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
32	AP2	Reifen aufnehmen und an Achse 1 (links) positionieren	AC2	55	1,00	55,00	1,98	Reifen 1/2/3	KLT	
33	AP2	Reifen auf Achse 1 (links) schieben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
34	AP2	Mutter aufnehmen und an Achse 1 (links) positionieren	AF2	65	1,00	65,00	2,34	DIN 1587 - M3	KLT	
35	AP2	Mutter mit Hand festschrauben	M-SCA	145	1,00	145,00	5,22			
36	AP2	Reifen aufnehmen und an Achse 1 (rechts) positionieren	AC2	55	1,00	55,00	1,98	Reifen 1/2/3	KLT	
37	AP2	Reifen auf Achse 1 (rechts) schieben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
38	AP2	Mutter aufnehmen und an Achse 1 (rechts) positionieren	AF2	65	1,00	65,00	2,34	DIN 1587 - M3	KLT	
39	AP2	Mutter mit Hand festschrauben	M-SCA	145	1,00	145,00	5,22			

40	AP2	Achsrohr 2 aufnehmen	AB2	45	1,00	45,00	1,62	Achsrohr	KLT	
41	AP2	Achse 2 aufnehmen	AB1	30	1,00	30,00	1,08	Achse	KLT	
42	AP2	Achsrohr 2 an hinterer Achsvorrichtung positionieren Stelle A (innen)	AF1	40	1,00	40,00	1,44			
43	AP2	Achse 2 an hinterer Achsvorrichtung positionieren Stelle A (vorne)	AF1	40	1,00	40,00	1,44			
44	AP2	Achse 2 durch Achsrohr 2 durchscheiben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
45	AP2	Achse 2 und Achsrohr 2 an hinterer Achsvorrichtung Stelle B Positionieren	AF1	40	1,00	40,00	1,44			
46	AP2	Achse 2 durch Achsrohr 2 weiter durchschieben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
47	AP2	Reifen aufnehmen und an Achse 2 (links) positionieren	AC2	55	1,00	55,00	1,98	Reifen 1/2/3	KLT	
48	AP2	Reifen auf Achse 2 (links) schieben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
49	AP2	Mutter aufnehmen und an Achse 2 (links) positionieren	AF2	65	1,00	65,00	2,34	DIN 1587 - M3	KLT	
50	AP2	Mutter mit Hand festschrauben	M-SCA	145	1,00	145,00	5,22			
51	AP2	Reifen aufnehmen und an Achse 2 (rechts) positionieren	AC2	55	1,00	55,00	1,98	Reifen 1/2/3	KLT	
52	AP2	Reifen auf Achse 2 (rechts) schieben	AC1	40	1,00	40,00	1,44			
53	AP2	Mutter aufnehmen und an Achse 2 (rechts) positionieren	AF2	65	1,00	65,00	2,34	DIN 1587 - M3	KLT	
54	AP2	Mutter mit Hand festschrauben	M-SCA	145	1,00	145,00	5,22			
55	AP2	Objektaufnahmen und auf Seite abstellen	AD2	45	1,00	45,00	1,62			

Tabelle 106: Morphologie zur Vorselektion (Datenbasis) (eigene Darstellung)

Mobilitätsgrad | Einfluss auf Komponenten des D-Pools						
D-Pool	Bewegungen des Werkers im Arbeitssystem					
	gering 0 - 1	gering 0 - 1	mittel 0 - 2	hoch 2 - 4	mittel 0 - 2	gering 0 - 1
	Devices					
	Screen (D ₁)	Touch Screen (D ₂)	Tablet (D ₃)	Glass (D ₄)	Projection (D ₅)	Light (D ₆)
	Bewegungen des Werkers im Arbeitssystem					
	hoch 2 - 4	mittel 0 - 2	gering 0 - 1	-	-	-
	Devices					
Sprache (D ₇)	Laser (D ₈)	Signal (D ₉)	...	...	...
Zugang zu der Werkerinformation | Einfluss auf Komponenten des D-Pools						
D-Pool	Art des Montageprinzips					
	gering 3 - 4	gering 3 - 4	mittel 2 - 3	hoch 0 - 2	mittel 3 - 4	gering 3 - 4
	Devices					
	Screen (D ₁)	Touch Screen (D ₂)	Tablet (D ₃)	Glass (D ₄)	Projection (D ₅)	Light (D ₆)
	Art des Montageprinzips					

	hoch 3 - 4	hoch 3 - 4	gering 3 - 4	-	-	-	
	Devices						
	Sprache (D ₇)	Laser (D ₈)	Signal (D ₉)	...	...	...
IR-Pool	Reale versus virtuelle Informationsdarstellung | Einfluss auf Komponenten des IR-Pools						
	Arbeitsplatzkomplexität						
	sehr gering 1 - 0,9	gering 0,9 - 0,6	mittel 0,6 - 0,4	mittel 0,6 - 0,4	mittel 0,6 - 0,4	hoch 0,4 - 0,2	sehr hoch 0,2 - 0
	Produktkomplexität						
	sehr gering 0 - 2	gering 1 - 3	mittel 2 - 5	mittel 3 - 5	mittel 5 - 7	hoch 6 - 8	sehr hoch 6 - 9
	Kognitive Werkerbelastung						
	sehr gering	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	sehr hoch
	Modus						
Signal (IR ₁)	Text (IR ₂)	Bild / Animation (IR ₃)	Video (IR ₄)	Voice (IR ₅)	Augmented Reality (IR ₆)		
Flexibilitätsgrad und Informationsquellen | Einfluss auf Komponenten des IP-Pools							
IP-Pool	Anzahl Produkte						
	gering 1		mittel 2 - 5		hoch > 5		
	Anzahl Produktvarianten						
	gering 1		mittel 2 - 10		hoch > 10		
	Informationsquellen						
Manuelle Konfiguration (IP ₁)		Integration in Kontrollsystem (ERP/MES) (IP ₂)		BPM (Data Driven Configuration) (IP ₃)			
Zeitpunkt der Informationsbereitstellung | Einfluss auf Komponenten des TS-Pools							
TS-Pool	Cognitive Workload						
	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	
	Sensor Systeme						
	Detektion mittels Sprache (TS ₁)	Detektion mittels Button (manuell) (TS ₂)	Detektion mittels Sacenner (manuell) (TS ₃)	Detektion mittels Nahrungssensork (TS ₄)	Detektion mittels RFID (manuell) (TS ₅)		
	Kognitive Werkerbelastung						
	> 0	> 0	> 0	> 0			
	Sensor Systeme						
Detektion mittels RFID (automatisch) (TS ₆)	Detektion mittels Hand-Local-Posi- tioning Sensor (TS ₇)	Detektion mittels Tool-Local-Posi- tioning Sensor (TS ₈)	Detektion mittels Kamera (TS ₉)				
Möglichkeit der Dialogführung und Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen | Einfluss auf Komponenten des T-Pool							
T-Pool	Verwendung eines Hilfs-, Betriebsmittels oder Werkzeuges						
	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	

	Hilfs-, Betriebsmittel oder Werkzeuge mit Möglichkeit zur Protokollierung / Dokumentation					
	Schrauber (T ₁)	Messsystem (T ₂)	Markierungs- system (T ₃)	Spann- einheit (T ₄)	Reinigungssys- tem (T ₅)	Roboter (T ₆)
	Verwendung eines Hilfs-, Betriebsmittels oder Werkzeuges					
	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0
	Hilfs-, Betriebsmittel oder Werkzeuge mit Möglichkeit zur Protokollierung / Dokumentation					
	Klebekatusche (T ₇)	Diverse Halb- automaten (T ₈)	Verpackungs- automaten (T ₈)	Automaten zur Leitungmon- tage (T ₉)	Automaten zur Normteilmon- tage (T ₁₀)	...
	Möglichkeit der Interaktion mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen | Einfluss auf Komponenten des T-Pools					
	Verwendung eines Hilfs-, Betriebsmittels oder Werkzeuges					
	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0
	Hilfs-, Betriebsmittel oder Werkzeuge mit Möglichkeit der Interaktion					
T-Pool	Schrauber (T ₁)	Messsystem (T ₂)	Markierungs- system (T ₃)	Spann- einheit (T ₄)	Reinigungssys- tem (T ₅)	Roboter (T ₆)
	Verwendung eines Hilfs-, Betriebsmittels oder Werkzeuges					
	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0
	Hilfs-, Betriebsmittel oder Werkzeuge mit Möglichkeit der Interaktion					
	Klebekatusche (T ₇)	Diverse Halb- automaten (T ₈)	Verpackungs- automaten (T ₈)	Automaten zur Leitungmon- tage (T ₉)	Automaten zur Normteilmon- tage (T ₁₀)	...
	Verwendung eines Hilfs-, Betriebsmittels oder Werkzeuges					

Tabelle 107: Handhabungs- und Montagekomplexitätsattribute nach SAMY und EIMARAGHY [123]

Gruppe	Attribute	Beschreibung	Komplexitätsfaktor, Cf
Handhabungsattribute	Symmetrie	$\alpha + \beta < 360$	0,70
	Symmetrie	$360 \leq \alpha + \beta < 540$	0,84
	Symmetrie	$540 \leq \alpha + \beta < 720$	0,94
	Symmetrie	$\alpha + \beta = 720$	1,00
	Größe	> 15 mm	0,74
	Größe	6 mm < size ≤ 15 mm	0,81
	Größe	≤ 0,25 mm	1,00
	Dicke	> 2 mm	0,27
	Dicke	0,25 mm < size ≤ 2 mm	0,50
	Dicke	≤ 0,25 mm	1,00
	Gewicht	< 0,454 kg (10 lb)	0,50
	Gewicht	> 0,454 kg (10 lb)	1,00
	Greifen und Manipulieren	Leicht zu erfassen und zu manipulieren	0,91
	Greifen und Manipulieren	Nicht leicht zu erfassen und zu manipulieren	1,00
	Assistenz	Mit einer Hand	0,34
	Assistenz	Mit einer Hand mit Griff-Hilfe	1,00

	Assistenz	Mit zwei Händen	0,75
	Assistenz	Mit zwei Händen mit Hilfe	0,57
	Verschachtelung und Verwirrung	Teile schneiden oder verheddern sich nicht, sind nicht flexibel	0,58
	Verschachtelung und Verwirrung	Teile schneiden oder verheddern sich oder sind flexibel	1,00
	Optische Vergrößerung	Nicht nötig	0,80
	Optische Vergrößerung	Notwendig	1,00
Gruppe	Attribute	Description	Average Complexity Factor, Cf
Montageattribute	Niederhalten	Nicht benötigt	0,54
	Niederhalten	Erforderlich	1,00
	Ausrichtung	Einfach auszurichten oder zu positionieren	0,86
	Ausrichtung	Nicht leicht auszurichten oder zu positionieren	1,00
	Einfügungswiderstand	Kein Widerstand	0,87
	Einfügungswiderstand	Widerstand gegen Einsetzen	1,00
	Zugänglichkeit	Keine Einschränkungen	0,57
	Zugänglichkeit	Behinderter Zugang oder eingeschränkte Sicht	0,81
	Zugänglichkeit	Behinderter Zugang und eingeschränkte Sicht	1,00
	Mechanische Befestigungsverfahren	Biegen	0,34
	Mechanische Befestigungsverfahren	Nieten	0,58
	Mechanische Befestigungsverfahren	Schraubenspannung	0,42
	Mechanische Befestigungsverfahren	Kunststoffverformung	1,00
	Nicht mechanische Befestigungsverfahren	Kein zusätzliches Material erforderlich	0,58
	Nicht mechanische Befestigungsverfahren	Lötverfahren	0,67
	Nicht mechanische Befestigungsverfahren	Chemisches Verfahren	1,00
	Nicht befestigungstechnische Prozesse	Manipulation von Teilen oder Baugruppen (Montage- oder Einstellteile, ...)	0,75
Nicht befestigungstechnische Prozesse	Andere Verfahren (Flüssigkeitseinfügung, ...)	1,00	

Tabelle 108: Referenzintervall des Beschreibungsparameters (eigene Darstellung)

Komponente	Beschreibungsparameter	Kodierung, Tendenzkennzahlen und geltende Regeln
T-Pool (Hilfs-, Betriebsmittel und Werkzeuge zur Protokollierung, Dokumentation und Interaktion)		
T ₁	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₂	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₃	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₄	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₅	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₆	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₇	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₈	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₉	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₁₀	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₁₁	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.
T ₁₂	Möglichkeit der Dialogführung (AD) und Interaktion (AI) mit Hilfs-, Betriebsmitteln und Werkzeugen	binär [0;1], wenn AD = 1 oder AI = 1, dann wird die Komponente mit 1 kodiert. Ist weder AD = 1 noch AI = 1, dann wird die Komponente mit 0 kodiert.

D-Pool (Devices – Informationsanzeigeräte)		
D ₁	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
D ₂	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
D ₃	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 2]
D ₄	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [3 – 4]
D ₅	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 2]
D ₆	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
D ₇	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [3 – 4]
D ₈	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 2]
D ₉	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
D ₁	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
D ₂	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
D ₃	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 2]
D ₄	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [3 – 4]
D ₅	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 2]
D ₆	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
D ₇	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [3 – 4]
D ₈	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 2]
D ₉	Mobilitätsgrad (DM)	DM = [0 – 1]
TS-Pool (Sensor Systeme zur Verbindung der physischen und digitalen Welt)		
TS ₁	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₂	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₃	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₄	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₅	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₆	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₇	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₈	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₉	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
TS ₁₀	Zeitpunkt der Informationsbereitstellung (TIP)	TIP = [1 – 0]
IR-Pool (Informationsrepräsentationsform)		
IR ₁	Produktkomplexität (PC)	PC = [0 – 2]
IR ₂	Produktkomplexität (PC)	PC = [0 – 3]
IR ₃	Produktkomplexität (PC)	PC = [2 – 5]
IR ₄	Produktkomplexität (PC)	PC = [5 – 7]
IR ₅	Produktkomplexität (PC)	PC = [6 – 8]
IR ₆	Produktkomplexität (PC)	PC = [6 – 9]
IR ₇	erfolgt in Abhängigkeit der Komponenten aus dem T-Pool	

II-Pool (Informationsquellen)		
II ₁	Flexibilitätsgrad (DF) und Informationsquellen (SI)	DF oder SI = [0 – 2], unter Beachtung, dass DF = SI
II ₂	Flexibilitätsgrad (DF) und Informationsquellen (SI)	DF oder SI = [2 – 5], unter Beachtung, dass DF = SI
II ₃	Flexibilitätsgrad (DF) und Informationsquellen (SI)	DF oder SI = [6 – 10], unter Beachtung, dass DF = SI

Tabelle 109: Optimierungsverfahren zur Lösung des aufgezeigten Optimierungsproblems nach [193]:

Bewertungskriterien	Optimierungsverfahren				
	Genetische Algorithmen	Simulated Annealing	Tabu Search	Branch and Bound	Threshold Accepting
Problemverträglichkeit	●	●	●	●	○
Effizienz	●	●	○	○	○
Robustheit	●	●	○	○	○
Flexible Gestaltung	●	○	○	○	○
Optimalitätsgarantie	○	○	○	●	○
Parametrisierung	○	○	○	○	○
Legende					
●	entspricht den Anforderungen				
○	entspricht zum Teil den Anforderungen				
○	entspricht den Anforderungen nicht				

MTM-UAS-ANALYSE												
Spielzeug LKW - Variante 1											Mai 2018	
Beginn:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Einzelteile liegen in Keintelbehältern vor.										
Ende:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Baugruppe ist vollständig montiert.										
Begrenzung:		KLTs sind mit Bauteilen befüllt, Werkzeuge stehen bereit.										
Nr.	Montagearbeitsplatz	Tätigkeits-Beschreibung	MTM-Kode	TMU	Anzahl	Häufigkeit	AxH	Gesamt TMU	Sekunden	Material	Materialbereitstellungsort	Werkzeug
1	Arbeitsplatz 1	Gehen von Arbeitsplatz zu Supermarkt	KA	25	8	1	8	200	7,20			
2	Arbeitsplatz 1	Verpackung aufnehmen (ablegen am Arbeitsplatz)	A83	60	1	1	1	60	2,16	Verpackung 1	KIT	
3	Arbeitsplatz 1	Gehen zurück zum Arbeitsplatz	KA	25	8	1	8	200	7,20			
4	Arbeitsplatz 1	Setzen / Aufstehen	KC	1	1	1	1	1	0,04			
5	Arbeitsplatz 1	Handvoll Müttern in Hand aufnehmen	AG2	65	1	1	1	65	2,34	ISO 4032 - M3	KLT	
6	Arbeitsplatz 1	Mutter aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF1	40	4	1	4	160	5,76			
7	Arbeitsplatz 1	Restliche Müttern zurücklegen	AA2	35	1	1	1	35	1,26			
8	Arbeitsplatz 1	Bodenplatte aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1	1	1	65	2,34	Bodenplatte	KLT	
9	Arbeitsplatz 1	Bodenplatte auf Vorrichtung justieren	PC1	30	1	1	1	30	1,08			
10	Arbeitsplatz 1	Kabinebaugruppe aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1	1	1	65	2,34			
11	Arbeitsplatz 1	Kabinebaugruppe auf Vorrichtung nachjustieren	PC1	30	1	1	1	30	1,08	Kabinebaugruppe 1	KLT	
12	Arbeitsplatz 1	Schraube 1 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1	1	1	85	3,06	ISO 14579 - TX - M3 x 15	KLT	
13	Arbeitsplatz 1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1	1	1	60	2,16			
14	Arbeitsplatz 1	Schraube 2 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1	1	1	85	3,06			
15	Arbeitsplatz 1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1	1	1	60	2,16			
16	Arbeitsplatz 1	Ladefläche aufnehmen und positionieren	AF2	65	1	1	1	65	2,34			
		Ladefläche auf Vorrichtung justieren	PC1	30				30	1,08			
Spielzeug LKW - Variante 2											Mai 2018	
Beginn:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Einzelteile liegen in Keintelbehältern vor.										
Ende:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Baugruppe ist vollständig montiert.										
Begrenzung:		KLTs sind mit Bauteilen befüllt, Werkzeuge stehen bereit.										
Nr.	Montagearbeitsplatz	Tätigkeits-Beschreibung	MTM-Kode	TMU	Anzahl	Häufigkeit	AxH	Gesamt TMU	Sekunden	Material	Materialbereitstellungsort	Werkzeug
1	Arbeitsplatz 1	Gehen von Arbeitsplatz zu Supermarkt	KA	25	8	1	8	200	7,20			
2	Arbeitsplatz 1	Verpackung aufnehmen (ablegen am Arbeitsplatz)	A83	60	1	1	1	60	2,16	Verpackung 2	KIT	
3	Arbeitsplatz 1	Gehen zurück zum Arbeitsplatz	KA	25	8	1	8	200	7,20			
4	Arbeitsplatz 1	Setzen / Aufstehen	KC	1	1	1	1	1	0,04			
5	Arbeitsplatz 1	Handvoll Müttern in Hand aufnehmen	AG2	65	1	1	1	65	2,34	ISO 4032 - M3	KLT	
6	Arbeitsplatz 1	Mutter aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF1	40	4	1	4	160	5,76			
7	Arbeitsplatz 1	Restliche Müttern zurücklegen	AA2	35	1	1	1	35	1,26			
8	Arbeitsplatz 1	Bodenplatte aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1	1	1	65	2,34	Bodenplatte	KLT	
9	Arbeitsplatz 1	Bodenplatte auf Vorrichtung justieren	PC1	30	1	1	1	30	1,08			
10	Arbeitsplatz 1	Kabinebaugruppe aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1	1	1	65	2,34			
11	Arbeitsplatz 1	Kabinebaugruppe auf Vorrichtung nachjustieren	PC1	30	1	1	1	30	1,08	Kabinebaugruppe 2	KLT	
12	Arbeitsplatz 1	Schraube 1 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1	1	1	85	3,06	ISO 14579 - TX - M3 x 15	KLT	
13	Arbeitsplatz 1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1	1	1	60	2,16			
14	Arbeitsplatz 1	Schraube 2 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1	1	1	85	3,06			
15	Arbeitsplatz 1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1	1	1	60	2,16			
16	Arbeitsplatz 1	Ladefläche aufnehmen und positionieren	AF2	65	1	1	1	65	2,34			
		Ladefläche auf Vorrichtung justieren	PC1	30				30	1,08			
Spielzeug LKW - Variante 3											Mai 2018	
Beginn:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Einzelteile liegen in Keintelbehältern vor.										
Ende:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Baugruppe ist vollständig montiert.										
Begrenzung:		KLTs sind mit Bauteilen befüllt, Werkzeuge stehen bereit.										
Nr.	Montagearbeitsplatz	Tätigkeits-Beschreibung	MTM-Kode	TMU	Anzahl	Häufigkeit	AxH	Gesamt TMU	Sekunden	Material	Materialbereitstellungsort	Werkzeug
1	Arbeitsplatz 1	Gehen von Arbeitsplatz zu Supermarkt	KA	25	8	1	8	200,00	7,20			
2	Arbeitsplatz 1	Verpackung aufnehmen (ablegen am Arbeitsplatz)	A83	60	1	1	1	60,00	2,16	Verpackung 3	KIT	
3	Arbeitsplatz 1	Gehen zurück zum Arbeitsplatz	KA	25	8	1	8	200,00	7,20			
4	Arbeitsplatz 1	Setzen / Aufstehen	KC	1	1	1	1	1,00	0,04			
5	Arbeitsplatz 1	Handvoll Müttern in Hand aufnehmen	AG2	65	1	1	1	65,00	2,34	ISO 4032 - M3	KLT	
6	Arbeitsplatz 1	Mutter aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF1	40	4	1	4	160,00	5,76			
7	Arbeitsplatz 1	Restliche Müttern zurücklegen	AA2	35	1	1	1	35,00	1,26			
8	Arbeitsplatz 1	Bodenplatte aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1	1	1	65,00	2,34	Bodenplatte	KLT	
9	Arbeitsplatz 1	Bodenplatte auf Vorrichtung justieren	PC1	30	1	1	1	30,00	1,08			
10	Arbeitsplatz 1	Kabinebaugruppe aufnehmen und in Vorrichtung positionieren	AF2	65	1	1	1	65,00	2,34			
11	Arbeitsplatz 1	Kabinebaugruppe auf Vorrichtung nachjustieren	PC1	30	1	1	1	30,00	1,08	Kabinebaugruppe 3	KLT	
12	Arbeitsplatz 1	Schraube 1 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1	1	1	85,00	3,06	ISO 14579 - TX - M3 x 15	KLT	
13	Arbeitsplatz 1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1	1	1	60,00	2,16			
14	Arbeitsplatz 1	Schraube 2 aufnehmen und positionieren	M-SAA	85	1	1	1	85,00	3,06			
15	Arbeitsplatz 1	Mit Maschinenschrauber Schraube festschrauben	M-SHS	60	1	1	1	60,00	2,16			
16	Arbeitsplatz 1	Ladefläche aufnehmen und positionieren	AF2	65	1	1	1	65,00	2,34			
		Ladefläche auf Vorrichtung justieren	PC1	30				30,00	1,08			

Abbildung 64: Beispiel standardisierter Input-Daten (erweiterte MTM-UAS Analyse) (eigene Darstellung)

Tabelle 110: Selektiert Komponenten des DAS (eigene Darstellung)

<i>Montagestation 1 (0 = nicht ausgewählt; 1 = ausgewählt)</i>			
Komponenten DAS		Ausgewählte Kompo- nenten unter menschengerechten Gestaltungs- faktoren (verglichen mit der Ausgangssituation)	Ausgewählte Komponenten unter menschengerechten und betriebswirtschaftlichen Ge- staltungsfaktoren (verglichen mit der Ausgangssi- tuation)
T ₁	Schraubarbeiten	1	1
T ₂	Prüf- und Messarbeiten	0	0
T ₃	Markierungsarbeiten	0	0
T ₄	Einspann- und Ausspannarbeiten	0	0
T ₅	Behandlungsarbeiten	0	0
T ₆	Kollaborative Robotikarbeiten	0	0
T ₇	Klebearbeiten	0	0
T ₈	Diverse Halbautomaten	0	0
T ₉	Verpackungsarbeiten	0	0
T ₁₀	Leitungenmontierarbeiten	0	0
T ₁₁	Schraubarbeiten	0	0
D ₁	Screen	1	0
D ₂	Touch Screen	1	0
D ₃	Tablet (Hand Data Terminal)	1	1
D ₄	Glass	1	0
D ₅	Projektion	1	0
D ₆	Light (Guided by Light)	1	0
D ₇	Sprache (Guided by Voice)	1	0
D ₈	Laser (Guided by Laser)	1	0
D ₉	Signal	1	0
TS ₁	Detection via Voice	1	0
TS ₂	Detection via Buttom	1	0
TS ₃	Detection via Barcode	1	0
TS ₄	Detection via integ. proximity switch	1	0
TS ₅	Task Detection via RFID (manual)	1	0
TS ₆	Task Detection via RFID (automat.)	1	0
TS ₇	Hand local Positioning	1	1
TS ₈	Tool local Positioning	1	0
TS ₉	PLC/Logfiles	1	1
TS ₁₀	Task Detection via Camera	1	0
IR ₁	Signal	1	0
IR ₂	Text	1	0
IR ₃	Bild / Animation	1	0
IR ₄	Video	1	1
IR ₅	Sprache	1	0
IR ₆	Augmented Reality	1	0
IR ₇	Interactions Signal (Trigger Signal)	1	1
II ₁	Mauelle Konfiguration	1	1
II ₂	Integration in Kontrollsystem (ERP/...)	1	0

Il ₃	BPM (Data-Driven Configuration)	1	0
IS ₁	TRL 9 - TRL 8	1	0
IS ₂	TRL 7 - TRL 5	1	0
IS ₃	TRL 4 - TRL 1	1	0

1. Berechnungsschritt: Monetär bewerte Ausgangssituation

Reiter: MTMA aus Reiter: MTM-UAS Analyse (erweitert) <ul style="list-style-type: none"> • Tätigkeitsbezeichnung • MTM-UAS Code • TMU (MTM-UAS) • Anzahl * Häufigkeit • TMU-Gesamt 	Reiter: HEPA <ul style="list-style-type: none"> • S1, S2, S3, S4, S5 • G • K(G) • Fract (K) • HEP
Reiter: LEARNA <ul style="list-style-type: none"> • Entropie Elemente H_{UAS} • Entropie Bauteile H_B • Einlernzeit Gesamt • Bearbeitungszeit für Produktionsmenge 	Endergebnis: <div style="border: 1px dashed black; border-radius: 10px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> Monetär bewerte Ausgangssituation (MTMA, HEPA, LEARNA) </div>

2. Berechnungsschritt: Selektion technischer Komponenten

Reiter: Vorselektion technischer Komponenten digitaler Assistenzsysteme <ul style="list-style-type: none"> • T-Pool: PRESELECTT-Pool (T_j (AD, AI)) • D-Pool: PRESELECTD-Pool (D_j (DM, AWI, SA)) • TS-Pool: PRESELECTTS-Pool (TS_j (TIP)) • IR-Pool: PRESELECTIR-Pool (IR_j(CWL, SA)) • II-Pool: PRESELECTII-Pool (II_j (DF, IS)) 	Endergebnis: <div style="border: 1px dashed black; border-radius: 10px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> binär codierte technische Komponenten </div>
---	---

3. Berechnungsschritt: Bildung von FIT-Werten der selektierten Komponenten

Reiter: Technologiedatenbank <ul style="list-style-type: none"> • Einfluss Komponenten aus IR-Pool auf Einlern- und Trainingszeit • Einfluss Komponenten aus T- und TS-Pool auf menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit • Einfluss Komponenten aus D-, TS- und IR-Pool auf die Ausführungszeit • Einfluss Komponenten aus T-, D-, TS-, IR-, II- und IP-Pool auf Investitionen 	Reiter: Multiplikatordaten <ul style="list-style-type: none"> • Anzahl von Werkzeugen • Anzahl von Arbeitsplätzen • Anzahl von Materialarten • Anzahl von Tätigkeiten mit Werkzeugen • Anzahl von Tätigkeiten ohne Werkzeuge
Reiter: FIT-Werte selektierter Komponenten <ul style="list-style-type: none"> • T-Pool: $SELECT_{T-Pool(T_j)} (MTME (PRESELECT_{T-Pool(T_j)}), HEPE (PRESELECT_{T-Pool(T_j)}), INVEST (PRESELECT_{T-Pool(T_j)})$ • D-Pool: $SELECT_{D-Pool(D_j)} (MTME (PRESELECT_{D-Pool(D_j)}), INVEST (PRESELECT_{D-Pool(D_j)}))$ • TS-Pool: $SELECT_{TS-Pool(TS_j)} (MTME (PRESELECT_{TS-Pool(TS_j)}), HEPE (PRESELECT_{TS-Pool(TS_j)}), INVEST (PRESELECT_{TS-Pool(TS_j)})$ • IR-Pool: $SELECT_{IR-Pool(IR_j)} (MTME (PRESELECT_{IR-Pool(IR_j)}), LEARNE (PRESELECT_{IR-Pool(IR_j)}), INVEST (PRESELECT_{IR-Pool(IR_j)})$ • II-Pool: $SELECT_{II-Pool(II_j)} (INVEST (PRESELECT_{II-Pool(II_j)}))$ • IP-Pool: $SELECT_{IP-Pool(IP_j)} (SELECT_{T-Pool(T_j)}, SELECT_{D-Pool(D_j)}, SELECT_{TS-Pool(TS_j)}, SELECT_{IR-Pool(IR_j)}, SELECT_{II-Pool(II_j)})$ 	Endergebnis: <div style="border: 1px dashed black; border-radius: 10px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> FIT-Werte der einzelnen technischen Komponenten (MTME, HEPE, LEARNE, INVEST) </div>

4. Berechnungsschritt: Iterative Ermittlung des Assistenzsystem Designs

Reiter: Zielfunktion und Nebenbedingungen <ul style="list-style-type: none"> • Abbildung des Zielfunktion • Abbildung der Nebenbedingungen 	Reiter: Genetischer Algorithmus (EA-Solver) <ul style="list-style-type: none"> • Auswahlmöglichkeit: Arbeitsplatzebene, Gesamtmontagelinie • Abbildung Chromosom • Festlegung Ziel – Zeilenwert (Bezug zur Zielfunktion) • Festlegung Variablenzellen • Festlegung und Kodierung der Nebenbedingungen (Bezug zu Nebenbedingungen)
Reiter: Ergebnis Visualisierung <ul style="list-style-type: none"> • Einlernzeit in Zeiteinheiten • Bearbeitungszeit nach Einlernzeit in Zeiteinheiten • Menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit in Zeiteinheiten • Einsparungspotenzial durch das digitale Assistenzsystem in Geldeinheiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen in das Assistenzsystem in Geldeinheiten • Amortisationszeit in Jahren Vergleich: <ul style="list-style-type: none"> • Ausgangssituation (MTMA, HEPA, LEARNA) • Soll-Situation (MTME, HEPE, LEARNE)
Endergebnis: <div style="border: 1px dashed black; border-radius: 10px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> Design des Assistenzsystems bewertet nach produktivitäts- und humanzpezifischen Effekten </div>	

Abbildung 65: Aufbau des PoC-Demonstrators (eigene Darstellung)

Tabelle 111: Qualitätsmerkmale des entwickelten Microsoft-Excel basierten PoC-Demonstrators
(eigene Darstellung)

Qualitätsmerkmale	Ausprägung	Bewertung
<p>Änderbarkeit/Wartbarkeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analysierbarkeit • Konformität • Stabilität • Modifizierbarkeit • Testbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Aufwand, um Mängel innerhalb des entwickelten PoC-Demonstrators zu diagnostizieren oder um änderungsbedürftige Zusammenhänge zu bestimmen, ist auf Grund der Komplexität der verknüpften Funktionen und Formeln in dem MS-Excel-basierten PoC-Demonstrator im Vergleich zu einem, auf standardisierten Softwaremodellen basierendem Tool, relativ hoch. Vor diesem Hintergrund ist ferner der Aufwand zur Beseitigung von Fehlern äquivalent zu sehen. • Bei der Entwicklung des PoC-Demonstrators wurde auf eine etwaige Beachtung von Normen zur Änderbarkeit IT-basierter Systeme (Softwaresysteme) verzichtet. Dies erhöht in der aktuellen Version auch die Wahrscheinlichkeit, dass im Zuge von Änderungen unerwartete Wirkungen eintreten. • Obgleich, der Aufwand zur Prüfung mit hohen Aufwänden verbunden ist, stellt eine umfangreiche Prüfung der Funktionalitäten bei Änderungen des PoC-Demonstrators eine absolute Notwendigkeit dar. 	mittel
<p>Benutzbarkeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Attraktivität • Bedienbarkeit • Erlernbarkeit • Konformität • Verständlichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Vor dem Hintergrund, dass in vielen Industrieunternehmen auf MS-Excel basierte Planungstools zurückgegriffen wird, ist der Aufwand zum Einsatz des PoC-Demonstrators recht gering und stellt innerhalb einer historisch gewachsenen IT-Landschaft in aller Regel keinen zusätzlichen Medienbruch dar. • Integrierte Markros, welche den Benutzer durch den PoC-Demonstrator führen, ist mit einem geringen Aufwand zur Bedienung des PoC-Demonstrators für den Benutzer verbunden. • Die Bereitstellung der erforderlichen Input-Daten sowie der zusätzlichen manuell einzugebenen Daten, ist mit einem gewissen Aufwand verbunden. Dieser Aufwand korrespondiert mit der Aktualität der Stammdaten von Industrieunternehmen. • Bei der Entwicklung des PoC-Demonstrators wrden keine spezifischen Normen oder Richtlinien im Zuge der Benutzbarkeit berücksichtigt. 	mittel
<p>Effizienz:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konformität 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Verhältnis zwischen Leistungsniveau des PoC-Demonstrators und der eingesetzten Ressourcen ist als sehr gut zu bewerten. Es wurde auf einem allge- 	gut

<ul style="list-style-type: none"> • Zeitverhalten • Verbrauchsverhalten 	<p>genwärtig verfügbaren standardisierten Software-system (MS-Excel) der PoC-Demonstrator entwickelt.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vor den gegenwärtig betrachteten Kombinationsmöglichkeiten sind Antwort- und Verarbeitungszeiten sowie Durchsatz bei der Funktionsausführung als gut zu beurteilen. 	
<p>Funktionalität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angemessenheit • Sicherheit • Interoperabilität • Konformität • Ordnungsmäßigkeit • Richtigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Der entwickelte PoC-Demonstrator erfüllt alle Funktionen, welche im Zuge des entwickelten Vorgehensmodells zur Planung und Evaluierung DAS in der cyber-physischen Montage zu beachten sind. Die Funktionen erfüllen die definierten Anforderungen. • Die MS-Excel basierte Applikation ermöglicht es, ganze Funktionen aus Teilfunktionen zusammenzusetzen. • Spezifische Standards, Konventionen oder gesetzliche Bestimmungen und ähnliche Vorschriften bezogen auf die Funktionalitäten oder auch im Hinblick auf Sicherheitsanforderungen sind nicht beachtet wurden. • Es werden durch den PoC-Demonstrator die richtigen Ergebnisse und Wirkungen, wie sie in dem Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung DAS definiert worden sind, geliefert. 	gut
<p>Übertragbarkeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anpassbarkeit • Austauschbarkeit • Installierbarkeit • Koexistenz • Konformität 	<ul style="list-style-type: none"> • Der entwickelte PoC-Demonstrator ist grundsätzlich auf allen MS-basierte Betriebssystemen anwendbar. Der Aufwand zur Installation des PoC-Demonstrators ist demnach gering. • Die Anpassbarkeit des PoC-Demonstrators auf nicht MS-basierte Betriebssysteme ist grundsätzlich gegeben. • Da es sich um eine Datei handelt, ist ein Austausch jeder Zeit ohne großen Aufwand möglich. Auch die geringe Größe der Datei macht einen einfachen Austausch möglich. • Bei der Entwicklung des PoC-Demonstrators wurden keine spezifischen Normen oder Richtlinien im Zuge der Übertragbarkeit berücksichtigt. 	gut
<p>Zuverlässigkeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fehlertoleranz • Konformität • Reife 	<ul style="list-style-type: none"> • Der vorliegende PoC-Demonstrator zeigt eine hohe Fehlertoleranz an. Durch die implementierten Makros ist der Fehlereinfluss durch den Bediener gering. Auch die Beschränkung der freien Bearbeitung der 	gut

<ul style="list-style-type: none"> Wiederherstellbarkeit 	<p>tabellenbasierten Kalkulationen und den dahinterstehenden komplexen und verknüpften Formeln, reduziert einen Fehlereinfluss durch den Bediener.</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Tatsache, dass der PoC-Demonstrator auf einer Datei basiert, welche über keine Verknüpfungen zu weiteren Dateien verfügt, ermöglicht im Falle von Systemausfällen eine rasche Wiederherstellung des PoC-Demonstrators. Bei der Entwicklung des PoC-Demonstrators wurden keine spezifischen Normen oder Richtlinien im Zuge der Übertragbarkeit berücksichtigt.
---	--

MTM-UAS-ANALYSE										
TU Wien Pilotfabrik 3D Drucker										
Mai 2018										
Beginn: Mitta-Station steht an ihrem Arbeitsplatz, Einzelteile liegen in Klarsichtbehältern vor										
Ende: Mitta-Station steht an ihrem Arbeitsplatz, Baugruppe ist vollständig montiert										
Bereitstellung: KLTs sind mit Bauteilen bestückt, Werkzeuge stehen bereit.										
No.	Montageauftrag/Station	Tätigkeits-Beschreibung	Mitarbeiter	TMU	Arzt	Gesamt TMU	Sekunden	Material	Materialbestellungsart	Werkzeug
1	Assembly Station 1	Unterer Rahmen: Winkelprofil links aufnehmen und auf Arbeitfläche legen	AC1	55	1	55,00	1,98	Winkelprofil 001 li	KIT	
2	Assembly Station 1	Unterer Rahmen: Winkelprofil rechts aufnehmen und auf Arbeitfläche legen	AC1	40	1	40,00	1,44	Winkelprofil 001 re	KIT	
3	Assembly Station 1	Unterer Rahmen: Winkelprofil vorne aufnehmen und auf Arbeitfläche legen	AC2	55	1	55,00	1,98	Winkelprofil 001 vs	KIT	
4	Assembly Station 1	Unterer Rahmen: Winkelprofil hinten aufnehmen und auf Arbeitfläche legen	AC1	40	1	40,00	1,44	Winkelprofil 001 hi	KIT	
5	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 1 aufnehmen und an Schraubpositionen legen	AF2	65	1	65,00	2,34			
6	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 2 aufnehmen und an Schraubpositionen nachjustieren	PC1	30	1	30,00	1,08			
7	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube aufnehmen und stecken	AF2	65	1	65,00	2,34			
8	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Mutter aufnehmen und an Schraube positionieren	AF1	40	1	40,00	1,44	001.863/A-2-Innensechkant-schraube DIN 912 M5 x 15	KLT	
9	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Mutter aufnehmen und an Schraube positionieren	AF1	40	1	40,00	1,44	001.863/A-1-Sechskantmutter ISO 40320 M5	KLT	
10	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	EH2	40	1	40,00	1,44			
11	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	M-SP5	230	1	230,00	7,56			
12	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	M-SP5	230	1	230,00	7,56			Maschinenschrauber
13	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	EH2	40	1	40,00	1,44			
14	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: zusätzliches Festziehen	M-SHA	55	1	55,00	1,98			Maschinenschrauber
15	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 2 aufnehmen und an Schraubpositionen legen	AF2	65	1	65,00	2,34			
16	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 3 aufnehmen und an Schraubpositionen nachjustieren	PC1	30	1	30,00	1,08			
17	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube aufnehmen und stecken	AF2	65	1	65,00	2,34	001.863/A-2-Innensechkant-schraube DIN 912 M5 x 15		
18	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Mutter aufnehmen und an Schraube positionieren	AF1	40	1	40,00	1,44	001.863/A-1-Sechskantmutter ISO 40320 M5		
19	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	EH2	40	1	40,00	1,44			
20	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	M-SP5	230	1	230,00	7,56			Maschinenschrauber
21	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	EH2	40	1	40,00	1,44			
22	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	M-SP5	230	1	230,00	7,56			Maschinenschrauber
23	Assembly Station 1	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	EH2	40	1	40,00	1,44			
24	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: zusätzliches Festziehen	M-SHA	55	1	55,00	1,98			
25	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 2 aufnehmen und an Schraubpositionen legen	AF2	65	1	65,00	2,34	Winkelprofil 001 li		
26	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 3 aufnehmen und an Schraubpositionen nachjustieren	PC1	30	1	30,00	1,08			
27	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Schraube aufnehmen und stecken	AF2	65	1	65,00	2,34	001.863/A-2-Innensechkant-schraube DIN 912 M5 x 15		
28	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Mutter aufnehmen und an Schraube positionieren	AF1	40	1	40,00	1,44	001.863/A-1-Sechskantmutter ISO 40320 M5		
29	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Schraube aufnehmen und stecken	EH2	40	1	40,00	1,44			
30	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	M-SP5	230	1	230,00	7,56			Maschinenschrauber
31	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	EH2	40	1	40,00	1,44			
32	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	M-SP5	230	1	230,00	7,56			
33	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Schraube anschrauben	EH2	40	1	40,00	1,44			
34	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: zusätzliches Festziehen	M-SHA	55	1	55,00	1,98			
35	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 4 aufnehmen und an Schraubpositionen legen	AF2	65	1	65,00	2,34			
36	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Winkelprofil 4 aufnehmen und an Schraubpositionen nachjustieren	PC1	30	1	30,00	1,08			
37	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Schraube aufnehmen und stecken	AF2	65	1	65,00	2,34			
38	Assembly Station 2	Vertikal Rahmen: Mutter aufnehmen und an Schraube positionieren	AF1	40	1	40,00	1,44			

Abbildung 66: Auszug erweiterte MTM-UAS Analyse der 3D-Drucker Montage (eigene Darstellung)

Tabelle 112: Performance Shape Factors zum Labor Use Case (eigene Darstellung)

Performance Shape Factor 2		S2	1
c ₃	Korrigierbarkeit		0,5
c ₄	Ereignistyp		0,5
c ₅	Risikotyp		0,5
Performance Shape Factor 3		S3	3,75
p ₁	Erfahrung/ Übung		1
p ₂	Aufmerksamkeit/ Wachsamkeit		1
p ₃	Arbeitstempo/ Reaktionsgeschwindigkeit		0,5
p ₄	Motivation		0,5
p ₅	Sonstige Faktoren		0,75
Performance Shape Factor 4		S4	0
e ₁	Klimafaktoren		0
e ₂	Beleuchtung		0
e ₃	Kontamination		0
e ₄	Lärm		0
e ₅	Vibrationen		0
e ₆	Beschleunigungen		0
e ₇	externe Bedrohungen		0
Performance Shape Factor 5		S5	0
s ₁	Schnittstelle / Werkzeug		0
s ₂	Informationsrückkopplung		0
s ₃	Systemsicherheit		0
s ₄	Technische Zuverlässigkeit		0
s ₅	Zeitstress / Zeitbudget		0
s ₆	Arbeitsdauer (Ermüdung)		0
s ₇	Arbeits-/ Aufgabenorganisation		0

Montagestation 1		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	1
	Glass	0
	Projektion	1
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	1
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	1
	Detektion mittels Button (manuell)	1
	Detektion mittels Scanner (manuell)	1
	Detektion mittels Näherungssensorik	1
	Detektion mittels RFID (manuell)	1
	Detektion mittels RFID (automatisch)	1
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	1
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	1
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	1
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR, TS, und Komponenten des IS-Pools sind von der Auswahl der anderen Komponenten abhängig.		

Abbildung 67: Vorselektierte Komponenten des Labor Use Cases (Montagestation 1)
(eigene Darstellung)

Montagestation 1		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	0
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeitsstationen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	0
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	1
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0
	Detektion mittels Button (manuell)	0
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0
	Detektion mittels Näherungssensorik	0
	Detektion mittels RFID (manuell)	0
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	1
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR7	Trigger Signal	1
TS9	PLC / Logdaten	0
IS-Pool	TRL 1 - TRL 4	0
	TRL 5 - TRL 7	1
	TRL 8 - TRL 9	0

Abbildung 68: Final selektierte Komponenten des Labor Use Cases (Montagestation 1)
(eigene Darstellung)

Montagestation 2		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	1
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	1
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	1
	Detektion mittels Button (manuell)	1
	Detektion mittels Scanner (manuell)	1
	Detektion mittels Nährungssensorik	1
	Detektion mittels RFID (manuell)	1
	Detektion mittels RFID (automatisch)	1
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	1
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	1
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	0
	Video	1
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR₇, TS₉ und Komponenten des IS-Pools sind von der Auswahl der anderen Komponenten abhängig.		

Abbildung 69: Vorselektierte Komponenten des Labor Use Cases (Montagestation 2)
(eigene Darstellung)

Montagestation 2		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	0
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	1
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0
	Detektion mittels Button (manuell)	0
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0
	Detektion mittels Nährungssensorik	0
	Detektion mittels RFID (manuell)	0
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	1
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR7	Trigger Signal	0
TS9	PLC / Logdaten	0
IS-Pool	TRL 1 - TRL 4	0
	TRL 5 - TRL 7	1
	TRL 8 - TRL 9	0

Abbildung 70: Final selektierte Komponenten des Labor Use Cases (Montagestation 2)
(eigene Darstellung)

Montagestation 3		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	1
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	1
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	1
	Detektion mittels Button (manuell)	1
	Detektion mittels Scanner (manuell)	1
	Detektion mittels Nährungssensorik	1
	Detektion mittels RFID (manuell)	1
	Detektion mittels RFID (automatisch)	1
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	1
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	1
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	1
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR₇, TS₉ und Komponenten des IS-Pools sind von der Auswahl der anderen Komponenten abhängig.		

Abbildung 71: Vorselektierte Komponenten des Labor Use Cases (Montagestation 3)
(eigene Darstellung)

Montagestation 3		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	0
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeitsstationen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	1
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0
	Detektion mittels Button (manuell)	0
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0
	Detektion mittels Näherungssensorik	0
	Detektion mittels RFID (manuell)	0
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	1
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR7	Trigger Signal	0
TS9	PLC / Logdaten	0
IS-Pool	TRL 1 - TRL 4	0
	TRL 5 - TRL 7	1
	TRL 8 - TRL 9	0

Abbildung 72: Final selektierte Komponenten des Labor Use Cases (Montagestation 3)
(eigene Darstellung)

Gesamtmontagelinie (Montagestationen 1-3)		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	1
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	1
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	1
	Detektion mittels Button (manuell)	1
	Detektion mittels Scanner (manuell)	1
	Detektion mittels Nährungssensorik	1
	Detektion mittels RFID (manuell)	1
	Detektion mittels RFID (automatisch)	1
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	1
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	1
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	1
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR₇, TS₉ und Komponenten des IS-Pools sind von der Auswahl der anderen Komponenten abhängig.		

Abbildung 73: Vorselektierte Komponenten des Labor Use Cases (Gesamtmontagelinie)
(eigene Darstellung)

Gesamtmontagelinie (Montagestationen 1-3)		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	0
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeitsstationen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	0
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	1
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0
	Detektion mittels Button (manuell)	0
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0
	Detektion mittels Näherungssensorik	0
	Detektion mittels RFID (manuell)	0
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	1
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	1
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR7	Trigger Signal	0
TS9	PLC / Logdaten	0
IS-Pool	TRL 1 - TRL 4	0
	TRL 5 - TRL 7	1
	TRL 8 - TRL 9	0

Abbildung 74: Final selektierte Komponenten des Labor Use Cases (Gesamtmontagelinie)
(eigene Darstellung)

MTM-UAS-ANALYSE												
ICS Doppelzylinder (DZ)												
Mai 2018												
Beginn:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Einzelteile legen in Kleinteilbehältern vor.										
Ende:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Baugruppe ist vollständig montiert.										
Berechnung:		KL Ts sind mit Bauteilen befüllt, Werkzeuge stehen bereit.										
No.	Montagearbeitsschritt	Tätigkeitsbeschreibung	MTM-Kode	TMU	Anzahl	Häufigkeit	Acht	Gesamt TMU	Sekunden	Material	Materialbereitstellungsort	Werkzeug
1	Assembly Station 1	Lesen des Montageauftrags (Kernung)	IAW	25	1	1,00	1,00	25,00	0,90			
2	Assembly Station 1	Getriebegehäuse auf nehmen und in Vorrichtung platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
3	Assembly Station 1	Zwischenschraube auf nehmen und am Gehäuse platzieren/stecken	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
4	Assembly Station 1	Platzieren der "Hand" in Richtung KL/Eintrahmeboven am AP	PA1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
5	Assembly Station 1	Kupplungsadapter auf nehmen und am Gehäuse platzieren/stecken	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
6	Assembly Station 1	Schraube aus KL/Eintrahmeboven auf nehmen und an Gewinde platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
7	Assembly Station 1	Schraube stecken und Gang suchen	MA-SAA	85	1	1,00	1,00	85,00	3,06			
8	Assembly Station 1	Schraube mit Maschinenschrauber festziehen	MA-SMS	100	1	1,00	1,00	100,00	3,60			
9	Assembly Station 1	Getriebegehäuse (Baugruppe) drehen um 90° und platzieren in Vorrichtung	AF1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
10	Assembly Station 1	Kupplung auf nehmen und an Getriebegehäuse (Baugruppe) platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
11	Assembly Station 1	Kupplung nachjustieren	ZD	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
12	Assembly Station 1	Spannmasse auf nehmen und am Getriebegehäuse (Baugruppe) platzieren/stecken	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
13	Assembly Station 1	Zwischenschraube auf nehmen und auf Spannmasse platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
14	Assembly Station 1	Baugruppe auf nehmen und in Hand ablegen	AE1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
15	Assembly Station 1	Baugruppe um 90° drehen	ZA1	5	1	1,00	1,00	5,00	0,18			
16	Assembly Station 1	Baugruppe in Vorrichtung platzieren	PC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
17	Assembly Station 1	Auf nehmen des Baugruppe und Ablegen auf Montageplatz 2	AC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
18	Assembly Station 1	Schraube mit Maschinenschrauber festziehen	MA-SMS	85	1	1,00	1,00	85,00	3,06			
19	Assembly Station 1	Schraube aus KL/Eintrahmeboven auf nehmen und an Gewinde platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
20	Assembly Station 2	Schlüssel aus Zylinder ziehen	AA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
21	Assembly Station 2	Schlüssel auf nehmen und am Zylinder platzieren	AC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
22	Assembly Station 2	Schlüssel einfügen	PC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
23	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - rechte Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
24	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - rechte Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
25	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - linke Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
26	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - linke Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
27	Assembly Station 2	Schlüssel aus Zylinder ziehen	AA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
28	Assembly Station 2	Schlüssel einfügen	PC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
29	Assembly Station 2	Baugruppe in der Hand drehen	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
30	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - rechte Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
31	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - rechte Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
32	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - linke Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
33	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - linke Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
34	Assembly Station 2	Schlüssel aus Zylinder ziehen	AA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			

Abbildung 75: Erweiterte MTM-UAS Analyse für das Produkt AA, stellvertretend für eine Variante (eigene Darstellung)

MTM-UAS-ANALYSE												
ICS Doppelzylinder Rundprofil (RDZ)												
Mai 2018												
Beginn:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Einzelteile legen in Kleinteilbehältern vor.										
Ende:		Mitarbeiterin steht an ihrem Arbeitsplatz, Baugruppe ist vollständig montiert.										
Berechnung:		KL Ts sind mit Bauteilen befüllt, Werkzeuge stehen bereit.										
No.	Montagearbeitsschritt	Tätigkeitsbeschreibung	MTM-Kode	TMU	Anzahl	Häufigkeit	Acht	Gesamt TMU	Sekunden	Material	Materialbereitstellungsort	Werkzeug
1	Assembly Station 1	Lesen des Montageauftrags (Kernung)	IAW	25	1	1,00	1,00	25,00	0,90			
2	Assembly Station 1	Getriebegehäuse auf nehmen und in Vorrichtung platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	Gehäusemodul A1	KL	
3	Assembly Station 1	Kupplungsadapter auf nehmen und platzieren/stecken	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	Kupplungsadapter A	KL	
4	Assembly Station 1	Kupplung auf nehmen und an Getriebegehäuse (Baugruppe) platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	Kupplung A	KL	
5	Assembly Station 1	Kupplung nachjustieren	ZD	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
6	Assembly Station 1	Zwischenschraube auf nehmen und in Vorrichtung platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	Gehäusemodul A2		
7	Assembly Station 1	Platzieren der "Hand" in Richtung KL/Eintrahmeboven am AP	PA1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
8	Assembly Station 1	Feder auf nehmen und am Gehäuse platzieren/stecken	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	Feder	KL	
9	Assembly Station 1	Spannmasse auf nehmen und an Gehäuse (Baugruppe) platzieren/stecken	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	Spannmasse		
10	Assembly Station 1	Baugruppe auf nehmen und in Hand ablegen	AE1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
11	Assembly Station 1	Baugruppe um 90° drehen	ZA1	5	1	1,00	1,00	5,00	0,18			
12	Assembly Station 1	Baugruppe in Vorrichtung platzieren	PC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
13	Assembly Station 1	Zwischenschraube auf nehmen und an Baugruppe platzieren	PA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
14	Assembly Station 1	Hammer auf nehmen und an Baugruppe platzieren	HA1	45	1	1,00	1,00	45,00	1,62			Hammer
15	Assembly Station 1	Baugruppe auf nehmen und in Vorrichtung platzieren	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44			
16	Assembly Station 1	Baugruppe drehen	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
17	Assembly Station 1	1. Schraube auf nehmen mit (Schraubendreher)	AA1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	ISO 14583, M2x1 x7 A2-ZD		
18	Assembly Station 1	Schraube in Kleinteil einsetzen	AA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
19	Assembly Station 1	Schraube an Baugruppe platzieren	PA1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
20	Assembly Station 1	Schraube festdrehen (inkl. Schraubendreher handhaben)	MA-SMS	230	1	1,00	1,00	230,00	8,28			Maschinenschrauber
21	Assembly Station 1	Kunststoffabdeckung auf nehmen und in Hand ablegen	AC1	40	1	1,00	1,00	40,00	1,44	Kunststoffabdeckung		
22	Assembly Station 1	Baugruppe auf nehmen und an Kunststoffabdeckung platzieren	AA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
23	Assembly Station 1	Kunststoffabdeckung in Baugruppe einfügen	AA1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
24	Assembly Station 2	Auf nehmen der Baugruppe und Ablegen auf Montageplatz 2	AE1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08	Schlüssel		
25	Assembly Station 2	Schlüssel auf nehmen und am Zylinder platzieren	AA1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
26	Assembly Station 2	Schlüssel einfügen	PC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
27	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - rechte Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
28	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - rechte Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
29	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - linke Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
30	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - linke Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
31	Assembly Station 2	Schlüssel aus Zylinder ziehen	AA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			
32	Assembly Station 2	Schlüssel einfügen	PC1	30	1	1,00	1,00	30,00	1,08			
33	Assembly Station 2	Baugruppe in der Hand drehen	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
34	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - rechte Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
35	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - rechte Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
36	Assembly Station 2	Drehen des Schließes (Bewegungsfolge) - linke Hand	ZB1	10	1	1,00	1,00	10,00	0,36			
37	Assembly Station 2	Umsetzen und weitere Bewegungsfolge - linke Hand	ZC1	30	2	1,00	2,00	60,00	2,16			
38	Assembly Station 2	Schlüssel aus Zylinder ziehen	AA1	20	1	1,00	1,00	20,00	0,72			

Abbildung 76: Erweiterte MTM-UAS Analyse des Produkts AB, stellvertretend für eine Variante (eigene Darstellung)

Montagestation 1		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	1
	Touch Screen	1
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	0
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	1
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	1
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	1
	Detektion mittels Button (manuell)	1
	Detektion mittels Scanner (manuell)	1
	Detektion mittels Näherungssensorik	1
	Detektion mittels RFID (manuell)	1
	Detektion mittels RFID (automatisch)	1
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	1
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	1
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	1
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	0
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	1
IR₇, TS₉ und Komponenten des IS-Pools sind von der Auswahl der anderen Komponenten abhängig.		

Abbildung 77: Vorselektierte Komponenten des Industrie Use Cases (Montagestation 1)
(eigene Darstellung)

Montagestation 1		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeitsstationen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	1
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	0
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0
	Detektion mittels Button (manuell)	0
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0
	Detektion mittels Näherungssensorik	0
	Detektion mittels RFID (manuell)	0
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	1
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	0
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	1
IR7	Trigger Signal	1
TS9	PLC / Logdaten	0
IS-Pool	TRL 1 - TRL 4	1
	TRL 5 - TRL 7	0
	TRL 8 - TRL 9	0

Abbildung 78: Final selektierte Komponenten des Industrie Use Cases (Montagestation 1)
(eigene Darstellung)

Montagestation 2		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	0
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	1
	Touch Screen	1
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	0
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	1
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	1
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	1
	Detektion mittels Button (manuell)	1
	Detektion mittels Scanner (manuell)	1
	Detektion mittels Nährungssensorik	1
	Detektion mittels RFID (manuell)	1
	Detektion mittels RFID (automatisch)	1
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	1
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	1
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	1
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	0
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	1
IR₇, TS₉ und Komponenten des IS-Pools sind von der Auswahl der anderen Komponenten abhängig.		

Abbildung 79: Vorselektierte Komponenten des Industrie Use Cases (Montagestation 2)
(eigene Darstellung)

Montagestation 2		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	0
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeitsstationen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	1
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	0
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0
	Detektion mittels Button (manuell)	0
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0
	Detektion mittels Näherungssensorik	0
	Detektion mittels RFID (manuell)	0
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	1
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	0
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	0
IR7	Trigger Signal	0
TS9	PLC / Logdaten	0
IS-Pool	TRL 1 - TRL 4	1
	TRL 5 - TRL 7	0
	TRL 8 - TRL 9	0

Abbildung 80: Final selektierte Komponenten des Industrie Use Cases (Montagestation 2)
(eigene Darstellung)

Gesamtmontagelinie (Montagestationen 1-2)		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeits Ebenen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	1
	Touch Screen	2
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	0
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	1
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	1
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	1
	Detektion mittels Button (manuell)	1
	Detektion mittels Scanner (manuell)	1
	Detektion mittels Nährungssensorik	1
	Detektion mittels RFID (manuell)	1
	Detektion mittels RFID (automatisch)	1
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	1
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	1
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	0
	Bild / Animation	1
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	0
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	1
IR₇, TS₉ und Komponenten des IS-Pools sind von der Auswahl der anderen Komponenten abhängig.		

Abbildung 81: Vorselektierte Komponenten des Industrie Use Cases (Gesamtmontagelinie)
(eigene Darstellung)

Gesamtmontagelinie (Montagestationen 1-2)		
Pool	DAS-Komponenten	Ausgewählte Komponenten [1 = ausgewählt]
T-Pool	Schraubarbeiten	1
	Prüf- und Messarbeiten	0
	Markierungsarbeiten	0
	Einspann- und Ausspannarbeiten	0
	Behandlungsarbeiten	0
	Kollaborative Robotikarbeitsstationen	0
	Klebearbeiten	0
	Diverse Halbautomaten	0
	Verpackungsarbeiten	0
	Leitungenmontierarbeiten	0
	Normteilemontierarbeiten	0
D-Pool	Screen	1
	Touch Screen	0
	Tablet (Hand Data Terminal)	0
	Glass	0
	Projektion	0
	Light (Guided by Light)	0
	Sprache (Guided by Voice)	0
	Laser (Guided by Laser)	0
	Signal	0
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0
	Detektion mittels Button (manuell)	0
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0
	Detektion mittels Näherungssensorik	0
	Detektion mittels RFID (manuell)	0
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0
	Detektion mittels Kamera	1
IR-Pool	Signal	0
	Text	1
	Bild / Animation	0
	Video	0
	Sprache	0
	Augmented Reality	0
II-Pool	Manuelle Konfiguration	0
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0
	BPM (Data Driven Configuration)	1
IR7	Trigger Signal	1
TS9	PLC / Logdaten	1
IS-Pool	TRL 1 - TRL 4	1
	TRL 5 - TRL 7	0
	TRL 8 - TRL 9	0

Abbildung 82: Final selektierte Komponenten des Industrie Use Cases (Gesamtmontagelinie)
(eigene Darstellung)

Pool	DAS-Komponenten	Autonomie Grad [0 = gering, 1 = hoch]
T-Pool	Schraubarbeiten	1,00
	Prüf- und Messarbeiten	1,00
	Markierungsarbeiten	1,00
	Einspann- und Ausspannarbeiten	1,00
	Behandlungsarbeiten	1,00
	Kollaborative Robotikarbeitsstationen	1,00
	Klebearbeiten	1,00
	Diverse Halbautomaten	1,00
	Verpackungsarbeiten	1,00
	Leitungenmontierarbeiten	1,00
	Normteilemontierarbeiten	1,00
D-Pool	Screen	0,25
	Touch Screen	0,25
	Tablet (Hand Data Terminal)	0,25
	Glass	0,70
	Projektion	0,70
	Light (Guided by Light)	0,50
	Sprache (Guided by Voice)	0,50
	Laser (Guided by Laser)	0,50
	Signal	0,50
TS-Pool	Detektion mittels Sprache	0,50
	Detektion mittels Button (manuell)	0,25
	Detektion mittels Scanner (manuell)	0,50
	Detektion mittels Nährungssensorik	0,70
	Detektion mittels RFID (manuell)	0,25
	Detektion mittels RFID (automatisch)	0,70
	Detektion mittels Hand-Local-Position-Sensor	0,75
	Detektion mittels Werkzeug Position Sensor	0,75
	Detektion mittels Kamera	1,00
IR-Pool	Signal	0,00
	Text	0,00
	Bild / Animation	0,00
	Video	0,00
	Sprache	0,00
	Augmented Reality	0,00
II-Pool	Manuelle Konfiguration	0,00
	Integration in Kontrollsystem (ERP/MES/...)	0,50
	BPM (Data Driven Configuration)	1,00

Abbildung 83: Autonomiegrade von Komponenten DAS (eigene Darstellung)

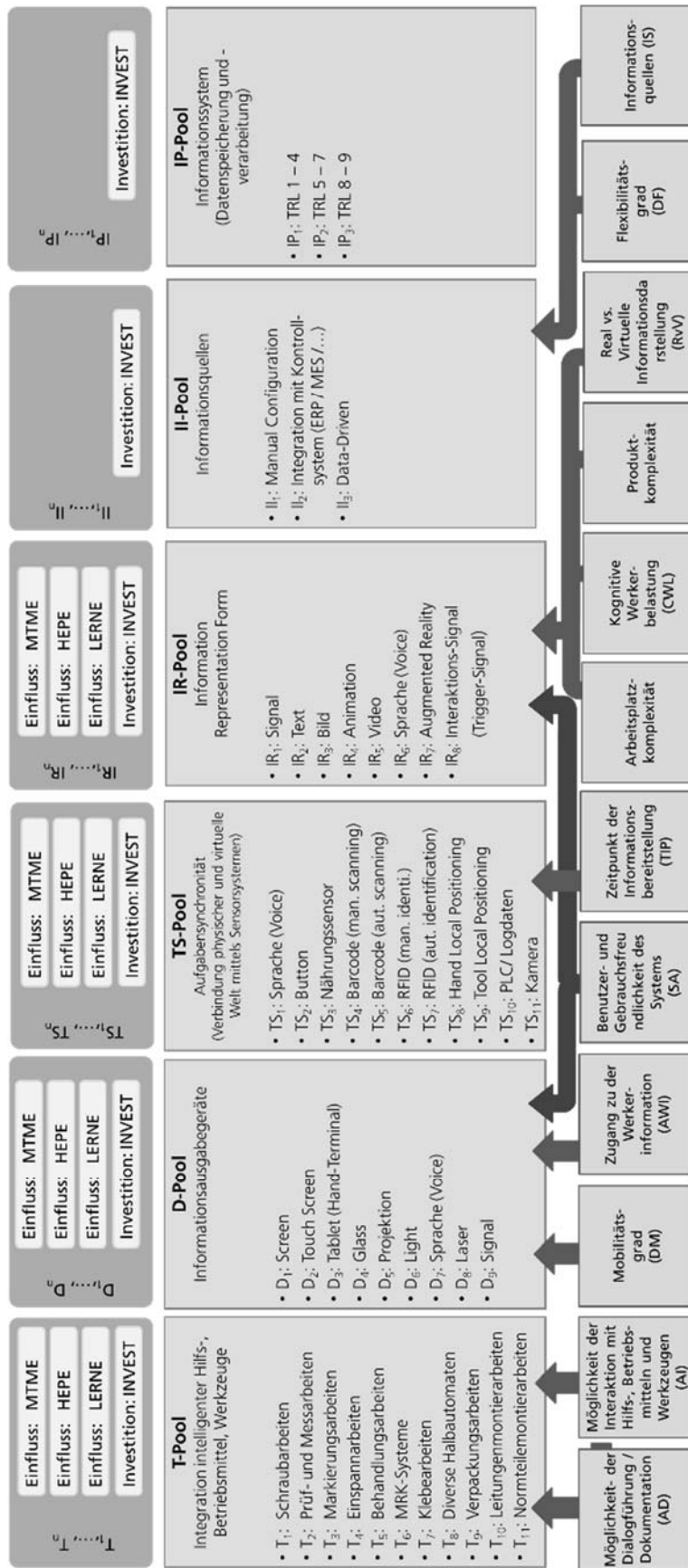


Abbildung 84: Einflüsse auf Wirtschaftlichkeits- und Produktivitätseffekte DAS (eigene Darstellung)

16 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Hold
Geburtsdatum / -ort: 15.11.1984 / Bad Hersfeld (Deutschland)
Nationalität: Deutsch

Beschäftigung und Berufserfahrung

01/2017 – heute Projektleiter, Fraunhofer Austria Research GmbH
Montageplanung und Assistenzsysteme
Geschäftsbereich Advanced Industrial Management

09/2015 – heute Lektor, Fachhochschule Technikum Wien
Arbeitswissenschaft und Ergonomie
Internationales Wirtschaftsingenieurwesen
FH-Prof. Mag. (FH) Dr. Judith Klamert-Schmid

07/2019 – 02/2020 Projektassistent, Technische Universität Wien
Institut für Managementwissenschaften
Mensch-Maschine-Interaktion
Univ.-Prof. Dr. Schlund

11/2014 – 06/2019 Kollegiatsmitarbeiter und Projektassistent,
Technische Universität Wien
CPPS – Cyber-Physical Production Systems
Institut für Managementwissenschaften
Betriebstechnik, Systemplanung & Facility Management
Univ.-Prof. Dr. Wilfried Sihn

3/2012 – 12/2016 Researcher, Fraunhofer Austria Resaerch GmbH
Geschäftsbereich Produktions- und Logistikmanagement
Produktionsoptimierung und Industrial Engineering

Akademische Laufbahn

12/2014 – heute Doktoratsstudium der Technischen Wissenschaften
Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften
Technische Universität Wien

10/2005 – 09/2011 Diplomstudium Wirtschaftsingenieurwesen
Studienrichtung Maschinenbau
Fakulät für Maschinenbau und Carl-Friedrich Gauss-Fakultät
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig