
Kognitive Assistenzsysteme zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Benedikt Jens Kelm

Saarbrücken
2025

Tag des Kolloquiums:	20.11.2025
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki
Akad. Mitarbeiter:	Dr.-Ing. David Böttger

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Montagesysteme der Universität des Saarlandes bzw. am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken. Als Teil der Gruppe „Automobilmontage und Produktion alternativer Antriebstechnologien“ durfte ich an vielen spannenden Projekten mitarbeiten, Verantwortung übernehmen sowie mich persönlich und fachlich weiterentwickeln.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller für die Möglichkeit zur Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen und die eingeräumten Freiheiten. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse für die Übernahme des Zweitgutachtens und sein Interesse an der Arbeit.

Diese Dissertation entstand unter Mithilfe vieler Menschen, die auf unterschiedliche Art zum Gelingen beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich meinen Freund und ehemaligen Arbeitskollegen Paul Hubert Haas, der mit seinem unermüdlichen Fleiß maßgeblich dazu beigetragen hat, den in dieser Dissertation beschriebenen Demonstrator aufzubauen und der mir als Sparringspartner stets konstruktiv zur Seite stand. Mein besonderer Dank gilt weiterhin Simon Jochum, der mir als „HiWi“ tatkräftig geholfen hat und ohne den die Arbeit in dieser Zeit nicht möglich gewesen wäre.

Weiterhin möchte ich meinem ehemaligen Gruppenleiter Dr.-Ing. Lennard Margies für die Rückendeckung und das entgegengebrachte Vertrauen danken. Ebenso danke ich allen Kolleginnen und Kollegen für die tolle gemeinsame Zeit und in Teilen für die Korrektur der Arbeit. Namentlich hervorzuheben sind Sarah Zimmer, Fabian Adler, Max Eichenwald, Fabian Klaus, Marco Schneider, Kevin Jungbluth, Philipp Litzenburger und Eric Holle. Meinen ehemaligen „HiWis“ Johannes Maffert, Brendan Thompson und Christian Bächle danke ich ebenfalls herzlich für die Unterstützung.

Neben meinen Wegbegleitern am Lehrstuhl möchte ich Dr.-Ing. „Sir“ Tobias Biegel für die Korrektur der Arbeit und die Freundschaft danken, die uns seit nun elf Jahren verbindet und die uns dieses Jahr wieder zusammengeführt hat. Außerdem danke ich Felix Lakatos für die langjährige Freundschaft und die gemeinsamen Reisen.

Meinen Eltern Ute und Prof. Dr. med. Jens Kelm danke ich dafür, dass sie durch ihre stetige Unterstützung das Fundament für meinen Weg gelegt haben. Meiner Schwester Leah danke ich für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit, und meinem Bruder Sebastian danke ich einfach dafür, dass es ihn gibt. Ein großer Dank gilt meiner Freundin Eva, die mir auf meinem Lebensweg unentwegt zur Seite steht und mir bei der Entstehung der Arbeit eine große Stütze war. Danke für dein Verständnis und für all die schönen Momente in unserem gemeinsamen Leben.

Zusammenfassung

Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage folgen meist einem „one-size-fits-all“-Ansatz und lassen sich nicht individuell an Nutzerkompetenzen anpassen. Zudem ist die Erstellung von Montageanweisungen insbesondere im Produktänderungsfall zeit- und ressourcenintensiv. Ziel dieser Dissertation ist es, der beschriebenen Problemstellung durch die Entwicklung eines integrierten Ansatzes zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen zu begegnen. Hierzu wird ein Kognitives Assistenzsystem entwickelt, das eine nutzeradaptive Informationsbereitstellung mit einer teilautomatisierten Generierung von Montageanweisungen kombiniert. Die Informationsbereitstellung erfolgt in Art und Tiefe dynamisch entlang eines vierstufigen Kompetenzstufenmodells. Ergänzend wird ein Montageanweisungsgenerator eingeführt, der mit Hilfe feinabgestimmter Large Language Models Montageanweisungen auf Grundlage vorhandener Informationen standardisiert generiert. Der entwickelte Ansatz wird im Rahmen einer Probandenstudie als Bestandteil einer als Demonstrator realisierten manuellen Montagestation am Beispiel der Montage eines Brennstoffzellen-Stacks evaluiert. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Gebrauchstauglichkeit (System Usability Scale: $87,83 \pm 4,17$) und Technologieakzeptanz des Systems. Die Evaluierung des Montageanweisungsgenerators belegt eine deutliche Beschleunigung der Erstellung von Montageanweisungen, bei gleichzeitig hoher Qualität der generierten Anweisungen.

Abstract

Cognitive assistance systems in manual assembly often follow a static “one-size-fits-all” approach and lack adaptability to individual worker competencies or changing production conditions. Additionally, authoring assembly instructions – especially in the case of product modifications – is time- and resource-intensive. The objective of this dissertation is to develop an integrated approach that enhances the adaptability of manual assembly stations by combining user-adaptive information delivery with the semi-automated generation of assembly instructions. A cognitive assistance system is developed that dynamically adjusts the level of instructional detail based on a four-stage competency model. In addition, an assembly instruction generator powered by fine-tuned Large Language Models is introduced to produce standardized instruction texts from existing process data. The proposed approach is implemented in a test bed environment and evaluated through a user study involving the manual assembly of a fuel cell stack. The results indicate high usability (System Usability Scale: $87,83 \pm 4,17$) and technological acceptance of the system. In addition, the evaluation of the assembly instruction generator demonstrates a substantial acceleration in the generation of assembly instructions, while maintaining a high standard of instruction quality.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Verzeichnis der Formelzeichen	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau der Dissertation	5
2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs	7
2.1 Einführung in die industrielle Montage: Bedeutung und Begriffe	7
2.1.1 Definition und Bedeutung der industriellen Montage	7
2.1.2 Produkt, Prozess und Betriebsmittel.....	8
2.2 Montagesysteme.....	11
2.2.1 Prinzipien der Montagesystemtechnik	11
2.2.2 Zeitdatenermittlung in der Montage	15
2.2.3 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen.....	17
2.3 Kognitive Assistenzsysteme.....	20
2.3.1 Definition und Funktionsweise von Kognitiven Assistenzsystemen ...	20
2.3.2 Technologien und Trends	23
2.4 Arbeitswissenschaftliche Betrachtung des Menschen in der Montage.....	26
2.4.1 Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung	26
2.4.2 Menschliche Informationsverarbeitung	27
2.4.3 Menschliches Lernverhalten und Kompetenz	29
2.5 Large Language Models	32

2.5.1 Grundlagen und Einordnung.....	32
2.5.2 Prompt Engineering und Fine-Tuning	34
2.6 Zusammenfassung und Fazit.....	35
3 Stand der Forschung	37
3.1 Nutzeradaptive Kognitive Assistenzsysteme	37
3.2 Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen	44
3.3 Interdisziplinäre Ansätze	52
3.4 Konkretisierung der Forschungslücke und Ableitung des Handlungsbedarfs.....	55
3.4.1 Ableitung der Bewertungskriterien	55
3.4.2 Bewertung und Diskussion bestehender Forschungsansätze	56
4 Ableitung der Anforderungen und methodisches Vorgehen.....	60
4.1 Ableitung der Anforderungen	60
4.2 Methodische Vorgehensweise	62
5 Systementwurf und Modellbildung	64
5.1 Modellierung Nutzeradaptivität.....	65
5.1.1 Ansatz zur kompetenzgerechten und nutzeradaptiven Unterstützung	65
5.1.2 Informationsbereitstellungsarten.....	67
5.1.3 Kompetenzstufenmodell zur Nutzeradaptivität.....	69
5.2 Modellierung Montageanweisung und Ableitung generische Syntax	73
5.2.1 Generische Modellierung von Textanweisungen	73
5.2.2 Ableitung einer standardisierten Syntax für Montageanweisungen ...	79
5.2.3 Entwicklung prozessabhängiger Syntaxbausteine für Montageanweisungen.....	82
5.2.4 Richtlinienbasierte Gestaltung von Montageanweisungen	84
6 Prototypische Umsetzung des Systementwurfs.....	88
6.1 Entwicklung Demonstrator	88
6.1.1 Technischer und konzeptioneller Rahmen des Demonstrators.....	88
6.1.2 Entwicklung und Konfiguration des Kognitiven Assistenzsystems.....	90

6.1.3	Prozessdatenerfassung und Fehlerdetektion.....	92
6.1.4	Informationsausgabe durch In-situ-Projektionen.....	94
6.2	Recommender-System zur Umsetzung der Nutzeradaptivität	99
6.2.1	Umsetzung der nutzeradaptiven Informationslogik	99
6.2.2	Frontend und Gamification.....	101
6.3	Assembly Instruction Generator	102
6.3.1	Technische Implementierung des AIG	103
6.3.2	Fine-Tuning der GPT-Modelle	106
6.3.3	Prompt-Engineering	110
6.3.4	Grafische Benutzeroberfläche	113
7	Evaluierung.....	117
7.1	Evaluierung des Assembly Instruction Generator	117
7.1.1	Bewertung der Generalisierungsfähigkeit der feinabgestimmten GPT-Modelle.....	117
7.1.2	Wirtschaftlichkeitsbewertung	119
7.1.3	Diskussion	123
7.2	Evaluierung des Kompetenzstufenmodells zur Nutzeradaptivität	124
7.2.1	Methodik	124
7.2.2	Ergebnisse.....	130
7.2.3	Diskussion	134
7.3	Reflexion der Forschungsfragen	137
8	Zusammenfassung und Ausblick	140
8.1	Zusammenfassung	140
8.2	Ausblick und konsekutiver Forschungsbedarf.....	142
	Literaturverzeichnis	144
A	Anhang zu Kapitel 2	164
B	Anhang zu Kapitel 3	168
C	Anhang zu Kapitel 5	169

D Anhang zu Kapitel 6	174
E Anhang zu Kapitel 7	175
Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	179
Publikationsliste	180

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Dissertation	5
Abbildung 2-1:	Montage als Zusammenspiel zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel.....	8
Abbildung 2-2:	Grundaufgaben der Montage und Eingliederung der Montageprozesse	10
Abbildung 2-3:	Manuelle Montagestation als soziotechnisches Arbeitssystem	12
Abbildung 2-4:	Organisationsformen der Montage	13
Abbildung 2-5:	Schematische Darstellung Montagevorranggraph.....	14
Abbildung 2-6:	Einsatzbereiche der verschiedenen Montagekonzepte	14
Abbildung 2-7:	Übersicht und Einordnung der MTM-Prozessbausteine im Kontext der Prozesstypologie	16
Abbildung 2-8:	Verdichtungskette des MTM-Prozessbausteinsystems	17
Abbildung 2-9:	Wandlungstreiber mit Auswirkung auf Montagesysteme	18
Abbildung 2-10:	Unterscheidung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.....	19
Abbildung 2-11:	Taxonomie der Assistenzsysteme	21
Abbildung 2-12:	Technischer Aufbau KAS.....	22
Abbildung 2-13:	Morphologie der Informationsübertragung zwischen Mensch und Kognitivem Assistenzsystem	23
Abbildung 2-14:	Individuelle Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung	27
Abbildung 2-15:	Sequenzielles Ablaufmuster menschlicher Informationsverarbeitung in der manuellen Montage	28
Abbildung 2-16:	Lernkurve nach De Jong	30
Abbildung 2-17:	Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Kompetenzniveau, Anzahl der Wiederholungen und der resultierenden Komfortzone.....	31
Abbildung 2-18:	Einordnung generativer KI und LLMs im Kontext der KI	33
Abbildung 2-19:	Aufteilung der Datensets und Vorgehensweise Fine-Tuning.....	34
Abbildung 4-1:	Vorgehenseise zur methodischen Lösungsentwicklung auf Basis des V-Modells.....	63
Abbildung 5-1:	Nutzeradaptives KAS im Kontext der Montage.....	65

Abbildung 5-2:	Ansatz zur Nutzeradaptivität durch kompetenzgerechte und lernkurvenbasierte Anpassung der Art und Tiefe von Montageanweisungen	67
Abbildung 5-3:	Nutzeradaptives Informationsbereitstellungsmodell zur kompetenzgerechten Anpassung der Art und Tiefe von Montageanweisungen	70
Abbildung 5-4:	Teilmodell Produkt.....	74
Abbildung 5-5:	Teilmodell Prozess	75
Abbildung 5-6:	Teilmodell Betriebsmittel	77
Abbildung 5-7:	Generische Modellierung montageanweisungsrelevanter Zusammenhänge manueller Montageprozesse.....	78
Abbildung 5-8:	Aufbau Montageanweisung	86
Abbildung 6-1:	Explosionsdarstellung der Basisbaugruppe eines PEM-Brennstoffzellen-Stacks	89
Abbildung 6-2:	Morphologischer Kasten zur systematischen Konfiguration eines Assistenzsystems	91
Abbildung 6-3:	Umsetzung der manuellen Vormontagestation mit integriertem KAS	92
Abbildung 6-4:	Erfassung der Handpositionen und Bewegungstrajektorien während der Montage mittels MediaPipe-Modell	93
Abbildung 6-5:	Erkennung von Montagefehlern durch Objektedetektion mit YOLOv8.....	94
Abbildung 6-6:	Vergleich der Anzahl der Montagefehler (links) und der kognitiven Beanspruchung (rechts) verschiedener Umsetzungsformen der Informationsbereitstellung.....	95
Abbildung 6-7:	Vergleich der Montagezeit von unterschiedlichen Montageoperationen bei verschiedenen Umsetzungsformen der Informationsbereitstellung.....	95
Abbildung 6-8:	In-situ-Projektionskonzept zur Informationsausgabe in der manuellen Vormontagestation	96
Abbildung 6-9:	In-situ-Projektion Montageanweisung Beamer	97
Abbildung 6-10:	Konzept zur Umsetzung der nutzeradaptiven Informationsbereitstellung innerhalb des Recommender-Systems.....	99
Abbildung 6-11:	Empfehlungsdialo g zur Anpassung der Kompetenzstufe im ILUO-Modell	101

Abbildung 6-12: Sequenzdiagramm zur Generierung von Montageanweisungen mit dem AIG	103
Abbildung 6-13: Integration von GPT-Modellen in den AIG	105
Abbildung 6-14: Beispiel Platzhalter zur Markierung einer unvollständigen Textanweisung	105
Abbildung 6-15: Vorgehensweise Fine-Tuning	107
Abbildung 6-16: Aufbau Prompt und eingesetzte Prompting Techniken zur Generierung von Montageanweisungen	111
Abbildung 6-17: Startfenster Assembly Instruction Generator	113
Abbildung 6-18: Editor Assembly Instruction Generator	114
Abbildung 6-19: Vorschauoption Montageanweisung.....	116
Abbildung 7-1: Produkte der Testdatensätze – Kopf- und Basisbaugruppe Brennstoffzellen-Stack (links) und Wasserpumpe (rechts)	118
Abbildung 7-2: BLEU- und METEOR-Scores der feinabgestimmten Modelle und Basismodelle im Vergleich.....	119
Abbildung 7-3: Übersicht Studiendesign.....	125
Abbildung 7-4: Versuchsaufbau.....	126
Abbildung 7-5: Prozessablauf Versuchsaufgabe	127
Abbildung 7-6: Kategorisierung des SUS-Scores: Akzeptanzbereiche und Adjektiveinstufungen	128
Abbildung 7-7: Prozesszeiten pro Durchgang	130
Abbildung 7-8: Gleitender Mittelwert Prozesszeiten	131
Abbildung 7-9: NASA-RTLX Scores zur kognitiven Beanspruchung vor und nach Stufenwechseln	132
Abbildung D-1: Ablaufdiagramm zur dynamischen Kompetenzstufenzuweisung innerhalb des Recommender-Systems.....	174
Abbildung E-1: NASA-RTLX-Fragebogen	176
Abbildung E-2: SUS-Fragebogen.....	177
Abbildung E-3: TAM-Fragebogen	178

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht und Erklärung der Wandlungsbefähiger	20
Tabelle 3-1:	Zusammenfassung und Vergleich identifizierter Ansätze im Themenfeld I: nutzeradaptive Kognitive Assistenzsysteme	44
Tabelle 3-2:	Zusammenfassung und Vergleich identifizierter Ansätze im Themenfeld II: Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen	51
Tabelle 3-3:	Bewertung der untersuchten Forschungsansätze	57
Tabelle 5-1:	Übersicht und Bewertung Informationsbereitstellungsarten	68
Tabelle 5-2:	Syntaxmodule zur generischen Beschreibung von Entnahmeoperationen	80
Tabelle 5-3:	Syntaxbausteine zur generischen Beschreibung von Füge- und Zwischenoperationen	81
Tabelle 5-4:	Auszug prozessbezogener Aufbau Syntaxbausteine	83
Tabelle 6-1:	Übersicht Laser In-situ-Projektionsarten.....	98
Tabelle 6-2:	Ergebnis Grid Search zur Auswahl der Hyperparameterkombination am Beispiel des WM-GPT Modells	110
Tabelle 6-3:	Übersicht eingesetzte Prompting-Techniken im AIG	112
Tabelle 7-1:	Wirtschaftlichkeitsrechnung	121
Tabelle 7-2:	Geschlossene Fragen zu den Kompetenzstufen	132
Tabelle 7-3:	Ergebnisse TAM	133
Tabelle 7-4:	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den unstrukturierten Interviews	133
Tabelle A-1:	Marktrecherche Kognitive Assistenzsysteme hinsichtlich Assistenzfunktionen.....	164
Tabelle A-2:	Marktrecherche Kognitive Assistenzsysteme hinsichtlich der Montageanweisungserstellung	166
Tabelle B-1:	Informationen zur systematischen Literaturrecherche im Themenfeld I: nutzeradaptive KAS	168
Tabelle B-2:	Informationen zur systematischen Literaturrecherche im Themenfeld II: Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen	168
Tabelle C-1:	Aussortierte Prozesse mit Begründung	169

Tabelle C-2:	Syntaxbausteine Montageprozesse Teil 1	170
Tabelle C-3:	Syntaxbausteine Montageprozesse Teil 2	171
Tabelle C-4:	Syntaxbausteine Warnungen.....	172
Tabelle C-5:	Syntaxbausteine Fehlermeldungen	173
Tabelle E-1:	Vergleich Zeiten zur Erstellung von Montageanweisungen	175

Abkürzungsverzeichnis

AfA	Absetzung für Abnutzung
AGeniA	Automatische Generierung industrieller Arbeitsanweisungen
AIG	Assembly Instruction Generator
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
ARES	Augmented Reality Expert System
BPMN	Business Process Model and Notation
CNL	Controlled Natural Language
CSV	Comma-Separated Values
DL	Deep Learning
ERP	Enterprise Resource Planning
GATM	General Assembly Task Model
GMW	gleitender Mittelwert
GPT	Generative Pre-Trained Transformer
GUI	Graphical User Interface
H2SkaProMo	Skalierbare cyberphysische Produktionssysteme zur Montage von Brennstoffzellen-Stacks
HMDs	Head-Mounted Displays
HMI	Human-Machine-Interface
IQR	Interquartilsabstand
JSON	JavaScript Object Notation
JSONL	JavaScript Object Notation Lines
KAS	Kognitive Assistenzsysteme
KI	Künstliche Intelligenz
LLMs	Large Language Models

MEA	Membrane Electrode Assembly
MEK	MTM für Einzel- und Kleinserienfertigung
MES	Manufacturing Execution System
ML	Machine Learning
MTM	Methods-Time Measurement
MW	Mittelwert
NASA-RTLX	NASA Raw Task Load Index
NASA-TLX	NASA Task Load Index
NFC	Near Field Communication
NLP	Natural Language Processing
ON	Ordnungsnummer
PEM	Proton Exchange Membrane
PEOU	Perceived Ease of Use
PU	Perceived Usefulness
SAR	Spatial Augmented Reality
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TCT	Task Completion Time
TMU	Time Measurement Units
UAS	Universelles Analysiersystem
UML	Unified Modeling Language
XML	Extensible Markup Language
XSL	Extensible Stylesheet Language
YOLO	You Only Look Once

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
t_{GMW}	s	Gleitender Mittelwert der letzten drei Montage- durchgänge
t_{MTM}	s	MTM-Vorgabezeit Montagedurchgang
I	€	Gesamtinvestition
n	Jahre	Nutzungsdauer
A	€/a	Abschreibungen
i	%	Kalkulatorischer Zinssatz
Z	€/a	Kalkulatorische Zinsen
K_f	€/a	Fixe Kosten
k_v	€/Anweisung	Variable Kosten pro Anweisung
T_s	h	Zeitersparnis pro Anweisung
P	€/h	Personalkosten
p	€/Anweisung	Preis pro Anweisung
B	Anweisungen/a	Break Even Point

Hinweis

Um die Lesbarkeit der Dissertation zu verbessern, wird im gesamten Text das generische Maskulinum für geschlechtsspezifische Begriffe verwendet. Es ist selbstverständlich zu beachten, dass stets beide Geschlechter gemeint sind.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Industriestandort Deutschland ist, wie kein anderes westliches Industrieland, auf die Produktion von Gütern ausgerichtet und wird durch die hohe wirtschaftliche Bedeutung des verarbeitenden Gewerbes geprägt [ABEL11, S. 6]. Im Jahr 2023 trug das verarbeitende Gewerbe mit 776 Milliarden Euro 20,29 % zur gesamten Bruttowertschöpfung bei [STAT24, S. 15]. Die Beschäftigungszahlen unterstreichen die volkswirtschaftliche Bedeutung dieses Sektors. So waren von den 46,26 Millionen Erwerbstätigen in Deutschland im Jahr 2023 7,52 Millionen im verarbeitenden Gewerbe beschäftigt, was einem Anteil von 16,26 % entspricht [STAT24, S. 19]. Innerhalb des verarbeitenden Gewerbes nimmt die Montage eine Schlüsselrolle ein, da sie als einer der beschäftigungsstärksten Bereiche gilt und maßgeblich zur industriellen Wertschöpfung beiträgt [MUEL09, S. 3].

Die industrielle Montage unterliegt verschiedenen Megatrends, die ihre Rahmenbedingungen beeinflussen. Dazu zählen insbesondere die Globalisierung [ABEL11, S. 10], die den Wettbewerbsdruck erhöht, sowie zunehmend gesättigte Märkte, die einen Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt hervorrufen [JACO13, S. 2]. Dies führt dazu, dass Unternehmen einem erhöhten Preisdruck ausgesetzt sind und gezwungen werden, ihre Produkte stärker zu differenzieren [KRAU18, S. 22]. Dieser Trend äußert sich in einer zunehmenden Anzahl personalisierter Produktvarianten und mündet in einer wachsenden Produkt- und Variantenvielfalt sowie einer Dynamisierung der Produktlebenszyklen [BAUE17, S. 9; MUEL17, S. 253; REIN17, S. XXXV]. In diesem Kontext gewinnt die manuelle Montage an Bedeutung, da automatisierte Montagesysteme bei kleinen Stückzahlen und häufigen Produktwechseln oft nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Dank seiner kognitiven und motorischen Fähigkeiten ist der Mensch automatisierten Systemen in Bezug auf Flexibilität und Anpassungsfähigkeit überlegen. [ZAEH09, S. 355; BAEC18, S. 34; HASL18, S. 48; BURG21, S. 319] Die zunehmende Variantenvielfalt und die damit einhergehenden Änderungen im Arbeitsablauf führen jedoch zu komplexeren Prozessen und stellen den Menschen vor hohe kognitive Anforderungen, da er zahlreiche Kombinationen von Arbeitsschritten mit geringer Wiederholhäufigkeit beherrschen muss [DOLL14, S. 341; REIN14, S. 561; BORN18, S. 264]. Während der Mensch aufgrund seiner Flexibilität unverzichtbar bleibt, rückt er zugleich als potenzielle Fehlerquelle in den Fokus, was die Notwendigkeit unterstützender Maßnahmen zur Reduzierung der kognitiven Belastung verdeutlicht [FRAN09, S. 825; SEHR21, S. 1]. Angesichts dieser Herausforderungen werden in der Industrie

zunehmend Kognitive Assistenzsysteme (KAS¹) eingesetzt, die die Ausführung manueller Tätigkeiten unterstützen, Entscheidungsprozesse erleichtern, den Montagefortschritt überwachen, Montageanweisungen kontextabhängig bereitstellen und die geforderte Qualität sicherstellen [FAST13, S. 450]. Ihr Ziel ist es, die Diskrepanz zwischen der menschlichen Leistungsfähigkeit und den Anforderungen der Arbeitsaufgabe zu minimieren [HOLD17, S. 144]. Zudem beschleunigen sie Lernkurveneffekte und ermöglichen dadurch eine höhere Lerngeschwindigkeit [FRAN09, S. 822], was einen schnelleren Produktionsanlauf bei neuen Produkten oder Varianten unterstützt und die Flexibilität gegenüber sich ändernden Marktanforderungen erhöht [LANG07, S. 113].

Ohne die Berücksichtigung soziodemografischer Entwicklungen greift der Einsatz von KAS zur Bewältigung der Montagekomplexität jedoch zu kurz. Eine steigende Lebenserwartung und sinkende Geburtenraten führen in Deutschland zu einem Rückgang der Erwerbsbevölkerung, während immer mehr Beschäftigte einem höheren Alterssegment angehören [ABEL11, S. 6]. Erhebungen des Statistischen Bundesamtes zeigen, dass die Alterskohorte der 50- bis 67-Jährigen zwischen 2010 und 2025 um 13,97 % auf 20,4 Millionen angestiegen ist. Zudem wird prognostiziert, dass die für die Industrie relevante Gruppe der 20- bis 67-Jährigen bis 2050 um 12,55 % auf 44,6 Millionen zurückgehen wird. [STAT25] Gleichzeitig führt verstärkte Zuwanderung in Kombination mit der Zunahme der Zeitarbeit zu einer immer heterogeneren Belegschaft. So unterscheiden sich die Beschäftigten insbesondere in der Montage hinsichtlich Alter, Qualifikation, Herkunft und Beschäftigungsform. [RADO99, S. 41; TEUB16, S. 350; HOLD17, S. 143] Die am Markt verfügbaren KAS berücksichtigen diesen Kontext oft nur unzureichend. Sie sind in der Regel statische Standardlösungen und verfolgen einen „one-size-fits-all“-Ansatz [FRAN09, S. 822], ohne individuelle Unterschiede der Nutzer zu berücksichtigen, was zu einer ineffizienten Informationsbereitstellung und mangelnder Akzeptanz führen kann [TEUB21, S. 6; KELM25b, S. 1].

Diese veränderten Rahmenbedingungen erfordern eine nutzeradaptive Gestaltung von KAS und eine kompetenzgerechte Informationsbereitstellung, um den individuellen Bedürfnissen gerecht zu werden und gleichzeitig die informatorischen Arbeitsbedingungen so zu verbessern, dass sowohl die Ausführungskompetenz gestärkt als auch die psychische Beanspruchung reduziert wird [BORN18, S. 267]. Nutzeradaptive KAS können zur Lösung der Problematik beitragen, indem sie eine personalisierte Unterstützung ermöglichen und die Leistungsfähigkeit älterer oder weniger erfahrener Beschäftigter gezielt fördern [DAND21, S. 48; SEHR21, S. 1].

¹ Im Rahmen dieser Dissertation wird die Abkürzung KAS für Kognitives Assistenzsystem verwendet. Zur besseren Lesbarkeit wird die vollständige Bezeichnung verwendet, wenn es der Kontext erfordert.

Eine weitere Herausforderung, die sich aus der beschriebenen Ausgangssituation ergibt, ist die effiziente Erstellung und Aktualisierung von Montageanweisungen für KAS. Die hohe Dynamik des Marktes mit häufigen Produkt- und Variantenwechseln macht kontinuierliche Anpassungen der Anweisungen unumgänglich [CLAE19, S. 1921]. Die Erstellung und Anpassung von Montageanweisungen ist meist ein zeitintensiver manueller Prozess, der Personalkapazitäten der Montageprozessplaner in der Arbeitsvorbereitung bindet [LUŠI17, S. 3; HOLD20, S. 24; REIS21, S. 235]. Diese Kapazitätsbindung führt in Verbindung mit den Anschaffungskosten zu hohen Total Cost of Ownership, was gegenwärtig den größten Vorbehalt der Industrie gegenüber KAS darstellt [NEB18, S. 1120; LANG07, S. 73]. Um dieser Herausforderung zu begegnen, bedarf es eines Ansatzes, der es ermöglicht, Montageanweisungen modular zu gestalten und automatisch aus vorhandenen Auftrags- und Erzeugnisdaten zu generieren [HINR21, S. 95].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Marktdynamiken wie steigende Variantenvielfalt und häufige Produktwechsel von soziodemografischen Entwicklungen flankiert werden. Die industrielle Montage steht vor der Herausforderung, in einem dynamischen Umfeld mit zunehmend heterogenem Montagepersonal wettbewerbsfähig zu bleiben [DOLL14, S. 340]. Seit den 2000er Jahren verfolgt die Industrie das Ziel, Montagesysteme wandlungsfähig zu gestalten, um innerhalb eines vorgedachten Lösungsraums flexibel auf Produktwechsel und neue Varianten reagieren zu können [EILE15, S. 1]. Diese Prinzipien müssen auch auf KAS übertragen werden, da ihr Lebenszyklus meist länger ist als der der Produkte [MERK21, S. 28]. Ein KAS sollte die Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems nicht einschränken, sondern zur Wandlungsfähigkeit beitragen. Hierzu sind Lösungskonzepte notwendig, die eine schnelle und effiziente Erstellung sowie Anpassung von Montageanweisungen ermöglichen. Neben der Bewältigung der Produktvielfalt sind darüber hinaus Konzepte zur Nutzeradaptivität für KAS erforderlich, die Werker unterschiedlicher Kompetenzstufen individuell in die Lage versetzen, eine größere Varianz an komplexen Produkten effizient zu montieren und den Menschen dabei gezielt als Wandlungsbefähiger einbeziehen. Dabei rückt die effektive Nutzung menschlicher Leistungsressourcen in den Fokus. Zukunftsfähige Produktionskonzepte zielen darauf ab, mithilfe nutzeradaptiver KAS ein harmonisches Zusammenspiel von Mensch, Technik und Organisation zu gewährleisten. Hierbei ist es entscheidend, dass Assistenzsysteme vom Menschen akzeptiert werden und er sie aus eigenem Antrieb nutzt, da er die Vorteile nachvollziehen kann [REIN14, S. 516].

1.2 Zielsetzung

Angeichts des beschriebenen Spannungsfeldes besteht das übergeordnete Ziel dieser Forschungsarbeit in der Entwicklung eines integrierten Ansatzes zur Realisierung eines Kognitiven Assistenzsystems, das als Bestandteil einer Montagestation eine nutzeradaptive Informationsbereitstellung mit einer beschleunigten Erstellung von Montageanweisungen vereint und so die Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen

erhöht. Ein zentraler Bestandteil dieser Zielsetzung ist die Entwicklung eines prototypischen Demonstrators, um die Umsetzbarkeit und den Nutzen des Konzepts praxisnah zu demonstrieren und zu evaluieren. Im Rahmen dieser Dissertation ergeben sich aus den identifizierten Herausforderungen der industriellen Montage und der übergeordneten Zielstellung zwei Teilziele. Zum einen ist es notwendig, dass sich das Assistenzsystem an die individuelle Kompetenzen und Erfahrungen der Werker anpasst, um sowohl Über- als auch Unterforderung zu vermeiden. Hierzu muss die Art und Tiefe der bereitgestellten Montageanweisungen dynamisch und nutzeradaptiv erfolgen (*Teilziel 1*). Zum anderen ist die effiziente Erstellung und Anpassung von Montageanweisungen ein entscheidender Faktor, da häufige Produktwechsel und Variantenvielfalt schnelle Änderungen erfordern. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss der Prozess der Montageanweisungserstellung beschleunigt werden (*Teilziel 2*).

Eine zentrale Grundlage zur Bearbeitung der Zielsetzung ist die Formulierung geeigneter Forschungsfragen, die sich aus den definierten Teilzielen ableiten. Obwohl die detaillierte Herleitung der Forschungslücke erst in Kapitel 3 erfolgt, werden die Forschungsfragen an dieser Stelle bewusst vorweggenommen. Sie dienen als methodischer Leitrahmen für die Strukturierung der Dissertation und werden durch die spätere Analyse des Stands der Forschung inhaltlich untermauert.

Forschungsfrage 1:
Wie kann die Nutzeradaptivität eines Kognitiven Assistenzsystems durch die Art und Tiefe der Informationsbereitstellung personenindividuell und kompetenzgerecht gesteigert werden?

Forschungsfrage 2:
Wie kann die Effizienz bei der Erstellung und Anpassung von Montageanweisungen für Kognitive Assistenzsysteme gesteigert und die Anpassungszeit insbesondere bei Produktänderungen reduziert werden?

Rahmenbedingungen und Eingrenzung des Betrachtungsbereichs

Die in dieser Dissertation entwickelte Lösung zielt auf die Konzeption Kognitiver Assistenzsysteme zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen ab. Der Betrachtungsbereich wird auf manuelle Arbeitsplätze der (Klein-) Serienmontage eingegrenzt.

1.3 Aufbau der Dissertation

Die vorliegende Dissertation ist in acht Kapitel gegliedert und folgt einer systematischen, wissenschaftlichen Vorgehensweise zur methodischen Bearbeitung der Zielsetzung in vier aufeinander aufbauenden Phasen: Analyse, Konzeption, Umsetzung und Bewertung. Abbildung 1-1 gibt einen Überblick über den Aufbau der Dissertation und die Zuordnung der Kapitel zu den Phasen.

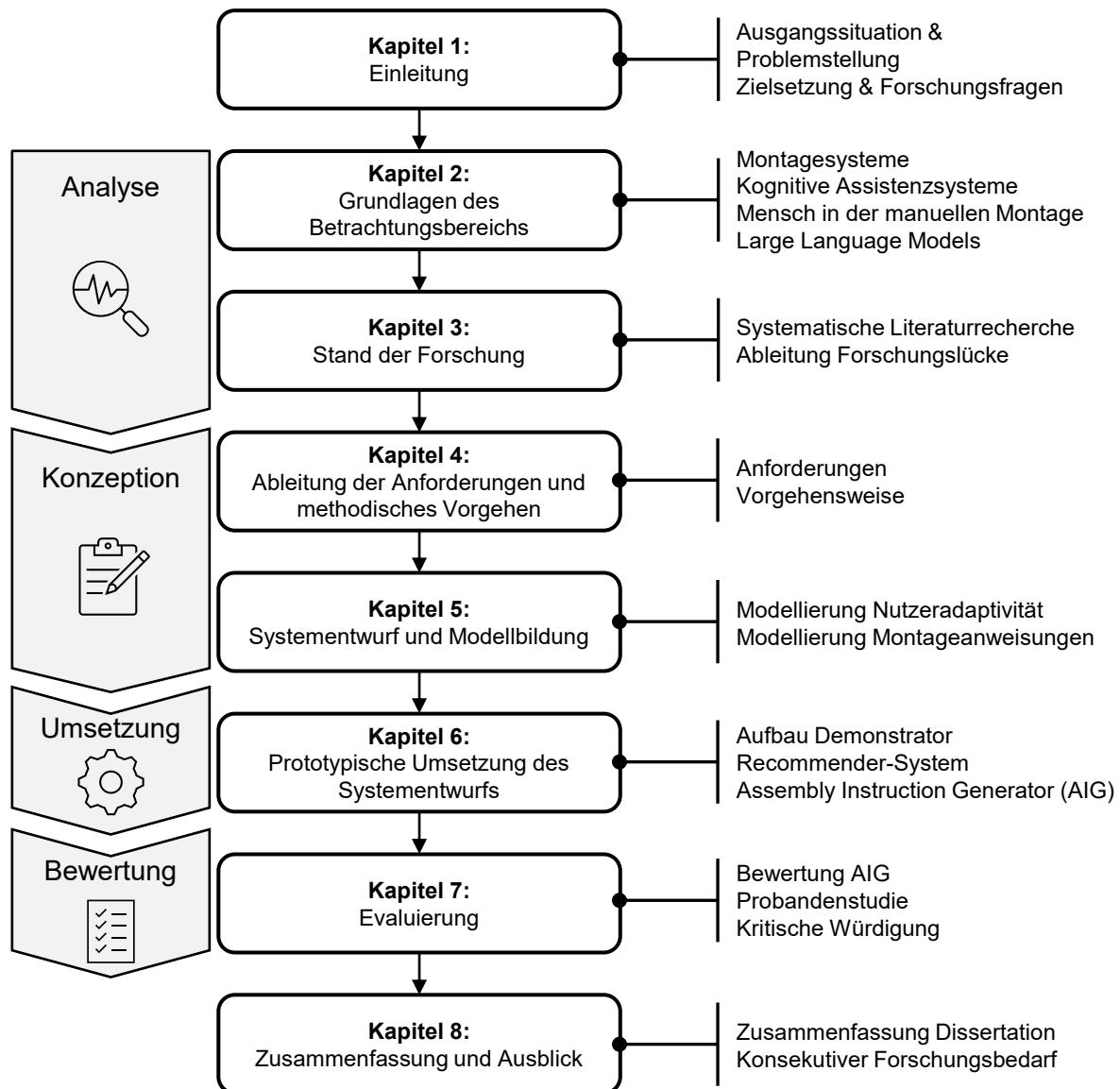


Abbildung 1-1: Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Dissertation

In Kapitel 1 wird die Ausgangssituation dargestellt, die daraus resultierende Problemstellung beschrieben und die Zielsetzung sowie die Forschungsfragen der Dissertation abgeleitet. Darüber hinaus werden der forschungsmethodische Rahmen und der Aufbau der Dissertation erläutert. Als erste Phase des methodischen Vorgehens erfolgt in den Kapiteln 2 und 3 die Analyse des Betrachtungsbereichs sowie des aktuellen Forschungsstands.

In Kapitel 2 werden die theoretischen und praktischen Grundlagen des Betrachtungsbereichs vermittelt, die für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel erforderlich sind. Dazu gehören die Grundlagen der Montagetechnik, KAS, arbeitswissenschaftliche Aspekte des Menschen in der Montage sowie Large Language Models (LLMs). In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Forschung durch zwei systematische Literaturrecherchen untersucht und darauf aufbauend die Forschungslücke abgeleitet.

An die Analyse schließt sich die Konzeptionsphase an, die in den Kapiteln 4 und 5 behandelt wird. In Kapitel 4 werden die Anforderungen an die Dissertation definiert, die gezielt den aus der Forschungslücke abgeleiteten Handlungsbedarf adressieren. Außerdem wird das methodische Vorgehen zur Erfüllung dieser Anforderungen skizziert. In Kapitel 5 werden konzeptionelle Ansätze modelliert, darunter ein nutzeradaptives Informationsbereitstellungsmodell zur kompetenzgerechten Anpassung der Art und Tiefe von Montageanweisungen sowie eine generische Beschreibung montageanweisungsrelevanter Zusammenhänge für eine standardisierte Syntax. Diese Modelle dienen als Grundlage für die anschließende Umsetzung.

Darauffolgend wird in Kapitel 6 die Umsetzung behandelt. Hier wird die prototypische Entwicklung eines Kognitiven Assistenzsystems zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen beschrieben. Im Mittelpunkt steht dabei die Umsetzung eines Konzepts zur nutzeradaptiven Informationsbereitstellung sowie die Entwicklung eines Montageanweisungsgenerators, der mit Hilfe von LLMs die standardisierte Erstellung von Montageanweisungen unter Nutzung vorhandener Erzeugnisdaten beschleunigt.

In Kapitel 7 folgt die Bewertungsphase, in der das entwickelte Konzept und dessen Umsetzung evaluiert werden. Dabei werden die Funktionalität und die Wirtschaftlichkeit des Montageanweisungsgenerators geprüft. Zudem werden die Nutzerakzeptanz und Gebrauchstauglichkeit des nutzeradaptiven Informationsbereitstellungsmodells im Rahmen einer Probandenstudie untersucht. Darüber hinaus werden die Zielerreichung und die Beantwortung der Forschungsfragen reflektiert. Abschließend werden in Kapitel 8 die Ergebnisse der Dissertation zusammengefasst und zukünftige Forschungsperspektiven aufgezeigt.

2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs

In diesem Kapitel werden die für die vorliegende Dissertation zentralen Begrifflichkeiten eingeführt, abgegrenzt und ein Verständnis für die relevanten Zusammenhänge vermittelt. In Kapitel 2.1 wird zunächst der Begriff Montage definiert und die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel erläutert. In Kapitel 2.2 werden der Aufbau sowie die Organisation von Montagesystemen und die Zeitdatenermittlung vorgestellt. Darüber hinaus werden auf Montagesysteme wirkende Wandlungstreiber und der Begriff Wandlungsfähigkeit erklärt. In Kapitel 2.3 werden KAS definiert, ihre Funktionsweise beschrieben und mögliche Einsatzgebiete aufgezeigt. Anschließend werden in Kapitel 2.4 menschliche Faktoren wie die Informationsverarbeitung, das Lernverhalten und der Kompetenzerwerb im Kontext der manuellen Montage und Kognitiver Assistenzsysteme erläutert. Abschließend werden in Kapitel 2.5 LLMs als Teilbereich der generativen Künstlichen Intelligenz (KI) eingeführt, die im Rahmen dieser Dissertation für die Generierung von Montageanweisungen relevant sind.

2.1 Einführung in die industrielle Montage: Bedeutung und Begriffe

In diesem Kapitel werden die für die vorliegende Dissertation relevanten Begriffe der Montage eingeführt. Zunächst wird der Begriff Montage definiert und von der Fertigung abgegrenzt sowie die wechselseitige Abhängigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel erläutert. Anschließend werden diese drei Elemente, die im Zusammenwirken die Montage prägen, detailliert beschrieben.

2.1.1 Definition und Bedeutung der industriellen Montage

Die Produktion lässt sich in die Teilbereiche Fertigung und Montage gliedern [WARN84, S. 437]. Nach MUELLER bildet die Montage zusammen mit der vorgelagerten Fertigung und der Logistik den Produktionsbereich innerhalb eines Unternehmens [MUEL21, S. 725]. Der Fokus dieser Dissertation liegt auf der industriellen Montage, die in der VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1 als der „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der [Produktion]“ definiert ist [VDI78, S. 3]. Während die VDI-Richtlinie 2815 den Begriff Fertigung anstelle von Produktion verwendet, wird im Rahmen dieser Dissertation – in Anlehnung an das Verständnis von WARNECKE und MUELLER – der Begriff Produktion eingesetzt, da dieser als übergeordnete Kategorie verstanden wird, die sowohl Fertigung als auch Montage umfasst. In der Montage wird das Endprodukt aus der Summe von Einzelteilen, Baugruppen und Modulen zusammengesetzt und in Betrieb genommen [MUEL21, S. 725]. Dabei besteht die Aufgabe der Montage darin, aus Einzelteilen ein Produkt höherer Komplexität mit definierten Funktionen in einer bestimmten Stückzahl pro Zeiteinheit herzustellen [WARN84, S. 470; LOTT12b, S. 1]. Da sich die Montage am Ende

des Auftragsdurchlaufes befindet, nimmt sie eine Schlüsselrolle im gesamten Produktionsprozess ein [MUEL09, S. 3]. Die Montage ist ein Sammelbecken für technische sowie organisatorische Schwierigkeiten und Fehler, die häufig bereits an anderen Stellen im Produktionsprozess verursacht werden und dann zu Störungen in der Montage führen [EVER89, S. 1; HESS12b, S. 19; MUEL21, S. 725].

Die besondere Bedeutung der Montage in Bezug auf die Gesamtproduktion lässt sich anhand unterschiedlicher Kennzahlen der Einzel- und Serienmontage verdeutlichen. Ihr Anteil an der Gesamtwertschöpfung beträgt bis zu 70 % [MAER12, S. 3]. Dabei nimmt die Montage je nach Branche und Sektor zwischen 15 % und 70 % der Gesamtdurchlaufzeit in Anspruch [LOTT12b, S. 3]. Zudem ist sie für bis zu 70 % der Kostenverursachung verantwortlich, während mit 75 % der Großteil der Kostenverantwortung auf die Konstruktion entfällt [GAIR81, S. 8]. Der Lohnkostenanteil der Montage beträgt dabei durchschnittlich 45 % [EVER89, S. 141]. Diese Kennzahlen verdeutlichen, dass die Montage ein kosten- und zeitkritischer Faktor in der industriellen Produktion ist und maßgeblich zur Gesamtwertschöpfung beiträgt.

Im Rahmen dieser Dissertation und aus Perspektive der Montagesystemplanung wird die Montage als Zusammenspiel von Produkt, Prozess und Betriebsmittel verstanden, bei dem wechselseitige Abhängigkeiten zu berücksichtigen sind. Wie in Abbildung 2-1 dargestellt, beeinflussen sich Produkt, (Montage-)Prozess und Betriebsmittel gegenseitig. Das Produkt entsteht durch den Prozess, dieser Prozess benötigt und verwendet bestimmte Betriebsmittel. Diese Systematisierung ist nicht unidirektional, sondern erfolgt in beide Richtungen. Bestehende Betriebsmittel bestimmen, welche Prozesse realisierbar sind und damit, welche Produkte hergestellt werden können. [MUEL21, S. 732]

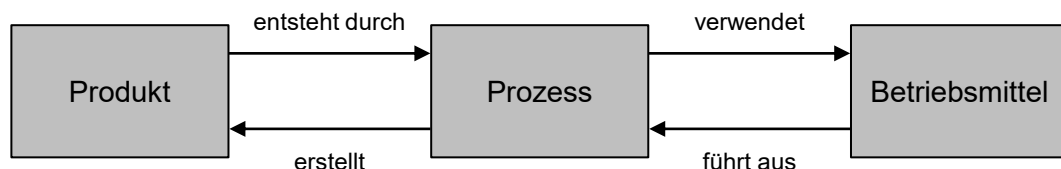


Abbildung 2-1: Montage als Zusammenspiel zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel (eigene Darstellung in Anlehnung an MUEL21, S. 733)

Um die Interdependenz zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel besser zu verstehen, ist es wichtig, die einzelnen Bestandteile näher zu betrachten. Daher werden im folgenden Kapitel das Produkt, Prozesse sowie Betriebsmittel detailliert beschrieben.

2.1.2 Produkt, Prozess und Betriebsmittel

Ein *Produkt* ist ein immaterielles und materielles Ergebnis des Produktentstehungsprozesses [RATH93, S. 7], das als Sachleistung ergänzt durch Dienstleistungen zur Verwertung auf dem Absatzmarkt entwickelt und hergestellt wird [LING94, S. 19].

Typischerweise durchläuft ein Produkt einen Lebenszyklus mit verschiedenen Phasen, die von der Einführung über das Wachstum und die Sättigung bis hin zum Rückgang und schließlich zum Marktaustritt reichen [SCHM13, S. 384].

Im Rahmen dieser Dissertation werden ausschließlich materielle Produkte betrachtet. Diese weisen eine Produktstruktur auf, die sich aus Bauteilen, Baugruppen und Modulen zusammensetzt [MUEL21, S. 733]. Unter einem Bauteil wird dabei ein nicht ohne Funktionsverlust weiter zerlegbares Objekt verstanden, das zusammengefügt eine vormontierte Baugruppe und/oder schließlich das Produkt ergibt [ELMA09b, S. 29]. Insbesondere komplexe Produkte werden mehrstufig aus Modulen und Baugruppen aufgebaut.

Externe Ursachen wie die Megatrends Globalisierung, Individualisierung, Dynamisierung der Produktlebenszyklen, neue Konsummuster und Technologiekonvergenz führen dazu, dass die Produkte immer komplexer werden und die Variantenvielfalt zunimmt [ABEL11, S. 10–16; KRAU18, S. 20]. Die Variantenvielfalt wird durch die Anzahl unterschiedlicher Ausführungsformen eines Bauteils, einer Baugruppe, eines Moduls oder eines Produkts charakterisiert [GROß04, S. 7].

Die Produktvarianz beschreibt in diesem Zusammenhang die Unterschiede in der Produkt- und Baugruppenstruktur sowie der Einzelkonstruktion [GROß04, S. 7]. Produktvarianten können in technische und strukturelle Varianten unterteilt werden. Technische Varianten umfassen Unterschiede in Geometrie, Material und Technologie. Strukturelle Varianten entstehen durch die Kombination unterschiedlicher Bauteile, Baugruppen und Module. Die Variantenbildung erfolgt somit durch die Montage von Bauteilen und Baugruppen und nicht durch Fertigungsprozesse. Strukturelle Varianten können auch durch Ergänzung von Bauteilen oder Baugruppen sowie durch die Wahl zwischen obligatorischen und fakultativen Alternativen entstehen. [LING94, S. 26–28]

Die Herstellung von Produkten erfolgt durch definierte Prozesse. Ein *Prozess* ist eine inhaltlich abgeschlossene zeitliche Folge von Transformationsschritten, die materiellen Input in einen prozessspezifischen materiellen Output überführen [SCHU10, S. 363]. Als Montageprozess wird die Gesamtheit aller Vorgänge bezeichnet, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Montageprozesse bestehen im Wesentlichen aus Vorgängen des Fügens gemäß DIN-Norm 8593 und Funktionen der Werkstückhandhabung nach VDI-Richtlinie 2860. [LOTT12b, S. 2] Diese werden von MUELLER auch als Grundaufgaben der Montage bezeichnet und um die Inbetriebnahme, Hilfsprozesse und Sonderoperationen erweitert [MUEL21, S. 726]. In Abbildung 2-2 ist zu sehen, dass jeder Grundaufgabe der Montage verschiedene Montageprozesse zugeordnet werden können. Die meisten dieser Montageprozesse sind in einschlägigen Normen wie der DIN-Norm 8593 Teil 1 bis Teil 8 sowie der VDI-Richtlinie 2860 definiert [DIN03; VDI90]. Obwohl die VDI-Richtlinie 2860 bereits 2018 zurückgezogen wurde, wird sie in der Fachliteratur weiterhin häufig als Referenz herangezogen und daher auch im Rahmen dieser Dissertation verwendet.

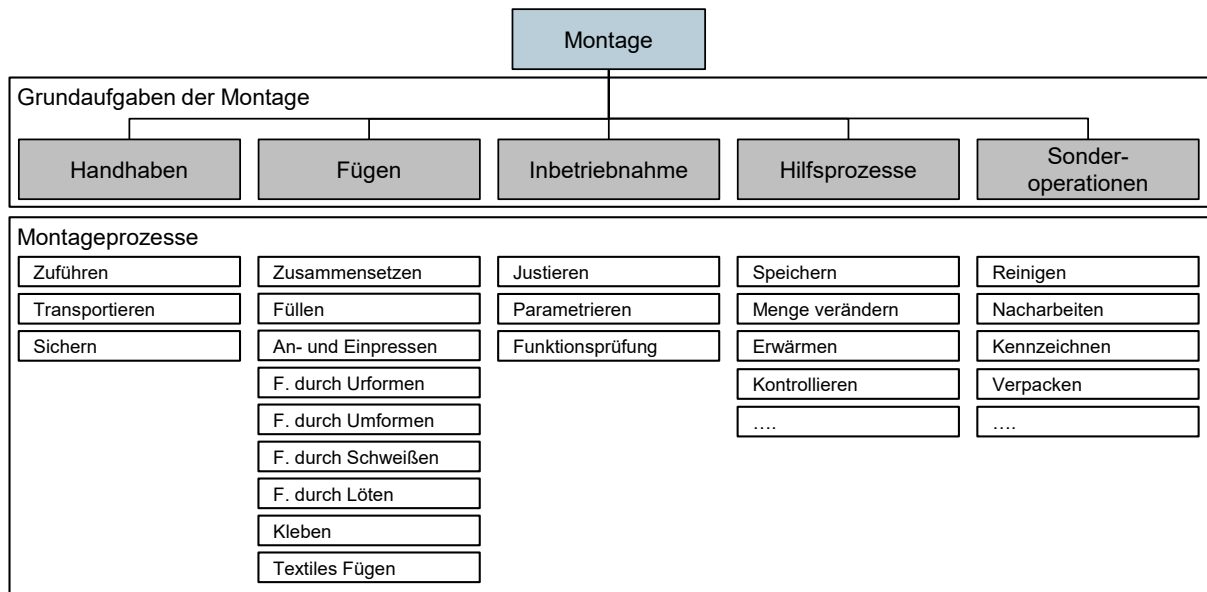


Abbildung 2-2: Grundaufgaben der Montage und Eingliederung der Montageprozesse (eigene Darstellung in Anlehnung an MUEL21, S. 727)

Die Grundaufgabe *Handhaben* bezeichnet „(...) das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem“ [VDI90, S. 2]. Sie umfasst das Zuführen bzw. Bereitstellen der für den Montageprozess benötigten Montageobjekte im erforderlichen Orientierungsgrad (Anzahl definierter rotatorischer Freiheitsgrade) und Positionierungsgrad (Anzahl definierter translatorischer Freiheitsgrade), das Transportieren von Baugruppen zwischen den Montagestationen sowie das Sichern des Montageobjektes während des Montageprozesses. [MUEL21, S. 727–729]

Fügen gilt als Kernaufgabe der Montage [LOTT12b, S. 2] und ist „das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff“ [DIN03, S. 3]. Unter dem Begriff Fügen werden Prozesse zusammengefasst, die sich in Bezug auf den Fügevorgang, die Fügebewegung sowie den Zusammenhalt und die Lösbarkeit der Verbindungen unterscheiden. Die Fügepartner können entweder direkt oder mit Hilfe von Verbindungselementen wie Schrauben oder Nieten verbunden werden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die kinematische Umsetzung der Fügebewegung, die rotatorisch, translatorisch oder eine Kombination beider Bewegungen sein kann. Zu den gebräuchlichsten Fügeprozessen gehören das Schrauben (Oberkategorie An- und Einpressen) und das Zusammensetzen. [MUEL21, S. 729–730]

Die *Inbetriebnahme* ist die letzte Phase, in der die Qualität des montierten Produkts beeinflusst und die grundlegenden, in der Produktspezifikation festgelegten Funktionen überprüft und sichergestellt werden. Sie umfasst das Justieren, Parametrieren und

die Funktionsprüfung und beinhaltet somit alle Prozesse, die einen betriebsfähigen Zustand gemäß der Spezifikationen gewährleisten. [MUEL21, S. 730–731]

Hilfsprozesse sind zur Erfüllung der Montageaufgaben notwendig, leisten aber keinen direkten Beitrag zum Montagefortschritt und sind daher nicht wertschöpfend. Zu ihnen gehören z. B. das Kontrollieren, Speichern oder Erwärmen. *Sonderoperationen* tragen im Gegensatz zu Hilfsprozessen zur Wertsteigerung des Produkts bei, sind jedoch keiner der Grundaufgaben wie Handhaben, Fügen oder Inbetriebnahme zuzuordnen. Zu den Sonderoperationen zählen beispielsweise das Reinigen des Endprodukts, das Kennzeichnen, das Verpacken und die Nacharbeit. [MUEL21, S. 731–732]

Montageprozesse bzw. -operationen werden entweder durch *Betriebsmittel* oder manuell von Werkern, mit oder ohne Zuhilfenahme von Betriebsmitteln, ausgeführt. Betriebsmittel werden in der VDI-Richtlinie 2815 Blatt 5 als „Anlagen, Geräte und Einrichtungen, die zur betrieblichen Leistungserstellung dienen“ definiert [VDI78, S. 2]. HESSE ET AL. beschreiben Betriebsmittel im Kontext der Montage als Objekte, die der Erfüllung von Montageprozessen in Montagestationen dienen [HESS12a, S. 1]. KLUGE und EILERS definieren diese aus der Perspektive der Montagesystemplanung als „Prozessmodule“ [KLUG11, S. 86; EILE15, S. 10]. Nach ihrer Definition sind Prozessmodule die Kernelemente jedes Montagesystems, da sie die wertschöpfenden Montageprozesse wie das Fügen durch z. B. Schrauben, Nieten oder Kleben, das Befüllen oder die Inbetriebnahme durchführen [MUEL11a, S. 430; EILE15, S. 10]. Je nach ingenieurwissenschaftlicher Perspektive werden die Begriffe Betriebsmittel und Prozessmodul mit unterschiedlichen Abgrenzungen oder synonym verwendet. Gemein ist allen Definitionen, dass sie Objekte zur Erfüllung spezifischer Aufgaben beschreiben.

2.2 Montagesysteme

Nachdem in Kapitel 2.1 die grundlegenden Begriffe der Montage definiert wurden, werden in diesem Kapitel die für die vorliegende Dissertation und die in den Kapiteln 5 und 6 entwickelte Lösung relevanten Aspekte und Zusammenhänge von Montagesystemen erläutert. Dabei erfolgt eine gezielte Eingrenzung des Betrachtungsbereichs, um den Fokus der Dissertation zu schärfen. Zu den behandelten Themen gehören unter anderem der Aufbau von Montagesystemen, die Montageorganisation, die Arbeitsvorbereitung, Montagevorranggraphen, die Zeitdatenermittlung sowie manuelle und automatisierte Montagekonzepte. Darüber hinaus wird die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen beschrieben.

2.2.1 Prinzipien der Montagesystemtechnik

Ein Montagesystem umfasst alle für den Betrieb notwendigen Elemente und besteht aus Montagezellen, die sich aus Montagestationen zusammensetzen [KLUG11, S. 20]. Die Montagestationen wiederum bestehen aus Modulen bzw. Betriebsmitteln [MUEL11a, S. 428; EILE15, S. 10]. Im Kontext dieser Dissertation, insbesondere im

Hinblick auf den Einsatz Kognitiver Assistenzsysteme, liegt der Fokus auf der Ebene der Montagestationen und ihrer Module bzw. Betriebsmittel. Aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive sind manuelle Montagestationen als Arbeitssysteme zu betrachten, genauer gesagt als soziotechnische Systeme [TROP24, S. 18]. Soziotechnische Systeme bestehen aus einem sozialen und einem technischen Teilsystem, die in enger Wechselwirkung zueinander stehen [SCHL18, S. 21]. Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, umfasst das soziale Teilsystem den Menschen als zentralen Akteur, seine Qualifikationen, Erfahrungen sowie seine Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen und sich an neue Anforderungen anzupassen. Der Mensch bestimmt, wie Arbeit organisiert wird, welche Abläufe sinnvoll sind und wie sich das System im Laufe der Zeit weiterentwickelt.

Das technische Teilsystem hingegen umfasst die für die Arbeitsaufgabe notwendigen Betriebsmittel wie Werkzeuge und digitale Hilfsmittel. Es bildet die Grundlage für die Umsetzung der geplanten Prozesse und unterstützt den Menschen bei seiner Tätigkeit. [SCHL18, S. 20–22]

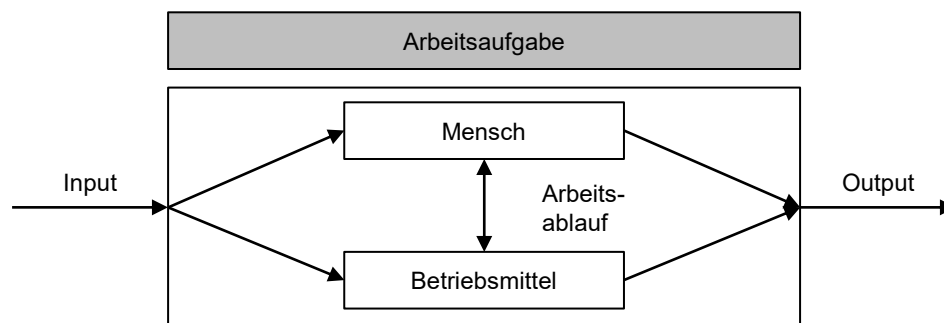


Abbildung 2-3: Manuelle Montagestation als soziotechnisches Arbeitssystem (eigene Darstellung in Anlehnung an REFA85, S. 82)

Der Aufbau und die Funktionsweise eines Montagesystems werden maßgeblich durch die gewählte Organisationsform sowie die Anordnung der einzelnen Montagestationen determiniert [EILE15, S. 15]. In Abbildung 2-4 sind die Organisationsformen der Montage dargestellt. Diese lassen sich anhand der Bewegung des Montageobjektes in örtlich konzentrierte (Baustellen- und Einzelplatzmontage) sowie auf mehrere Stationen verteilte Systeme (Reihen-, Fließ- und Taktstraßenmontage) unterteilen [SPUR86, S. 598]. Sinnvolle Organisationsformen für den Einsatz Kognitiver Assistenzsysteme sind die Reihenmontage, die stationäre Fließmontage, die Baustellenmontage und besonders die Einzelplatzmontage, also jene Formen, in denen der Mensch zentrale Entscheidungen trifft und manuelle Tätigkeiten ausführt. Insbesondere in der Einzelplatzmontage werden typischerweise umfangreiche Montagetätigkeiten und eine hohe Anzahl manueller Prozessschritte durch den Menschen ausgeführt, wodurch ein erhöhter Bedarf an individueller, kognitiver Unterstützung entsteht. [ZAEH07, S. 646-447] Daher liegt der Fokus dieser Dissertation auf der Einzelplatzmontage.

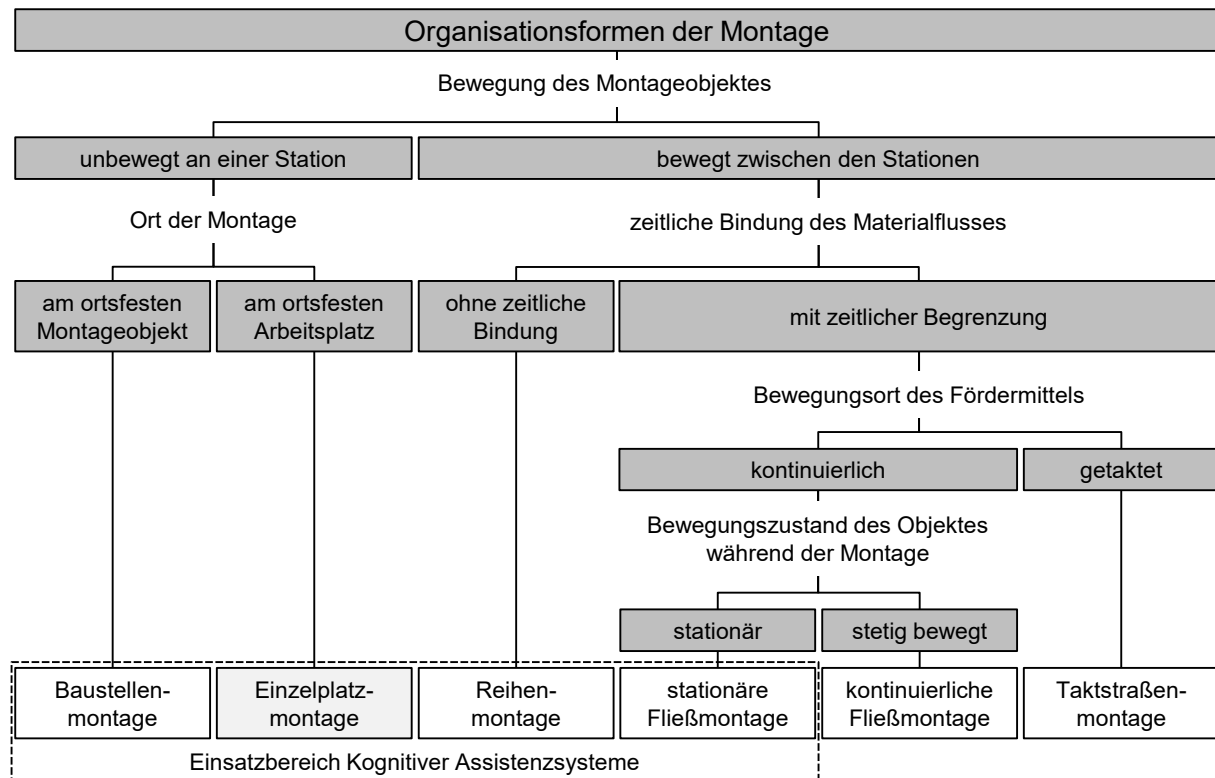


Abbildung 2-4: Organisationsformen der Montage (eigene Darstellung in Anlehnung an SPUR86, S. 598)

Die Festlegung der Organisationsform und der Struktur eines Montagesystems stellt einen zentralen Bestandteil der Montagesystemplanung dar. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Planung von Montagesystemen, wie sie beispielsweise von BULLINGER, EVERSHEIM, LOTTER und KONOLD & REGER beschrieben werden [BULL86; EVER89; LOTT92; KONO09].

Trotz unterschiedlicher Details folgen diese Ansätze einem vergleichbaren Ablauf, der auf der Interdependenz von Produkt, Prozess und Betriebsmittel basiert (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Planung erfolgt in mehreren iterativen Phasen. Sie beginnt mit der Analyse des Produkts, gefolgt von der Festlegung des Montageprozesses und den damit einhergehenden Entscheidungen, die alle relevanten Aspekte der Prozessgestaltung berücksichtigen. Die Planung endet schließlich mit der Bestimmung der erforderlichen Betriebsmittel.

Innerhalb des beschriebenen Planungsablaufs nimmt die Prozessplanungsphase eine zentrale Rolle ein. Nach der Produktanalyse legt die Arbeitsvorbereitung in der Prozessplanungsphase, basierend auf den vorliegenden Produktinformationen sowie den technischen und unternehmensspezifischen Randbedingungen, die notwendigen Arbeitsschritte und deren Reihenfolge fest [DEUS12, S. 88]. Zur Planung der Reihenfolge werden oftmals in der Arbeitsvorbereitung, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, Montagevorranggraphen erstellt.

Ein Vorranggraph ist eine netzplanähnliche Darstellung von Montageoperationen, bei der die einzelnen Operationen als Knoten und ihre Abhängigkeitsbeziehungen als Verbindungslinien (Kanten) zwischen den Knoten dargestellt werden. Die Montageoperationen werden zum Zeitpunkt ihrer frühesten Ausführbarkeit eingetragen. Das Ende der von einem Knoten ausgehenden Kanten zeigt den Zeitpunkt an, zu dem die entsprechende Operation spätestens abgeschlossen sein muss. [BULL86, S. 94]

Neben der netzplanähnlichen Darstellung werden Montageoperationen auch in Tabellenform erfasst, wobei die einzelnen Operationen verbal beschrieben werden. Der Vorranggraph bietet darüber hinaus eine übersichtliche Gesamtstruktur des Montagesystems und dient nach Überprüfung und Diskussion als Grundlage für die mögliche Gliederung in manuelle und automatische Montagestationen [KONO09, S. 120].

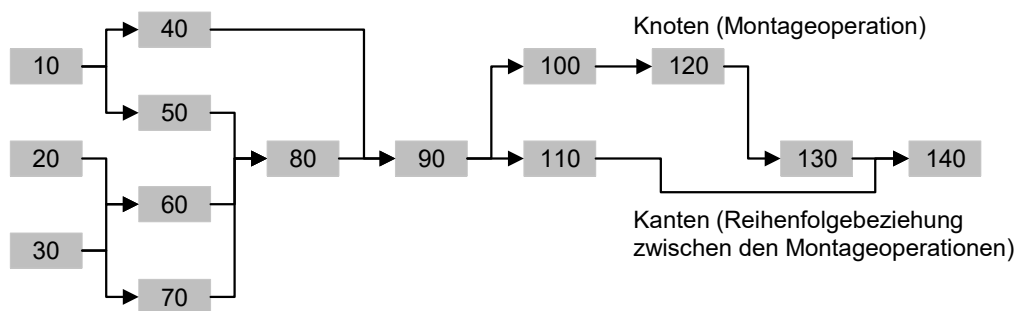


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung Montagevorranggraph

Die Ausführung von Montageprozessen lässt sich hinsichtlich des Grades des menschlichen Eingriffs klassifizieren. Es wird zwischen der manuellen, der hybriden (teilautomatisierten) sowie der (voll-) automatisierten Montage unterschieden [KONO09, S. 5].

In Abbildung 2-6 sind die Montagekonzepte ihren jeweiligen Einsatzbereichen zugeordnet.

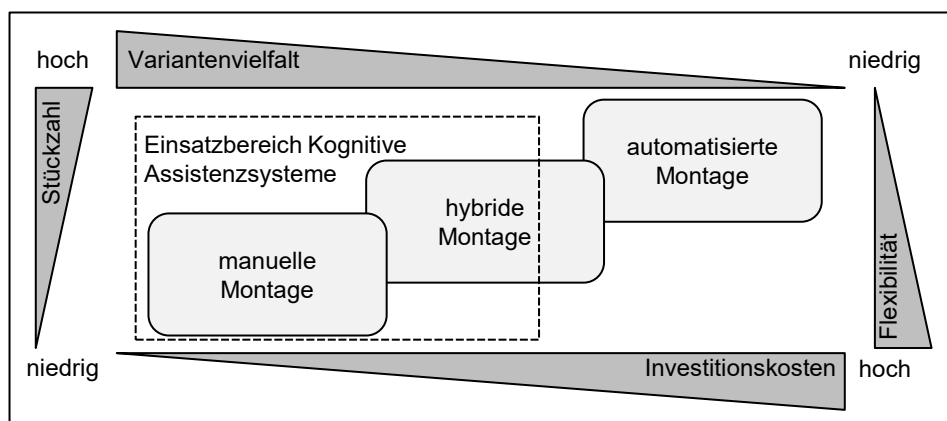


Abbildung 2-6: Einsatzbereiche der verschiedenen Montagekonzepte (eigene Darstellung in Anlehnung an LOTT12, S. 168)

Es wird deutlich, dass die manuelle Montage eine hohe Flexibilität bei geringer Investition bietet und sich besonders bei hoher Variantenvielfalt eignet, jedoch nur bei

geringen Stückzahlen wirtschaftlich ist. Die automatisierte Montage ist für hohe Stückzahlen prädestiniert, erfordert jedoch hohe Investitionen, weist eine geringe Flexibilität auf und ist daher bei hoher Variantenvielfalt nicht geeignet. [LOTT12b, S. 3] Dazwischen liegt die hybride Montage, die durch eine zeitliche Kopplung zwischen Mensch und Automat charakterisiert ist [LOTT12, S. 168].

Wie der Begriff „manuell“ (lat. manus: Hand) bereits andeutet, werden in der manuellen Montage die Montageprozesse von Menschen ausgeführt. Dabei setzt der Mensch seine Hände, Fingerfertigkeit, Sinnesorgane und Intelligenz ein, um die Montageprozesse bzw. -operationen mit Hilfe von Betriebsmitteln durchzuführen [LOTT12a, S. 109]. Der Nutzen Kognitiver Assistenzsysteme entfaltet sich vor allem dort, wo der Mensch den Hauptteil der Arbeit leistet, weshalb in dieser Dissertation die manuelle Montage im Vordergrund steht.

Nachdem die grundlegenden Strukturen, Organisationsformen sowie Montagekonzepte von Montagesystemen erläutert wurden, wird im Folgenden der Schwerpunkt auf die Methoden der Zeitdatenermittlung gelegt, die für eine effiziente Planung und Steuerung der Montageprozesse unerlässlich sind.

2.2.2 Zeitdatenermittlung in der Montage

Die Zeitdatenermittlung ist in der Arbeitsvorbereitung von großer Wichtigkeit [DEUS12, S. 88], da sie die Grundlage für eine effiziente Planung und Steuerung der Montageprozesse bildet. Im Planungsstadium stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, um montagespezifische Vorgabezeiten zu bestimmen, darunter das Schätzen und Vergleichen, die Planzeitwertermittlung und die Systeme vorbestimmter Zeiten [BULL86, S. 107].

Systeme vorbestimmter Zeiten, wie Methods-Time Measurement (MTM), zerlegen manuelle Arbeitsprozesse in Grundbewegungen und ordnen diesen vordefinierte Normzeitwerte zu, die auf empirischen Versuchsreihen basieren [KONO09, S. 123]. Die dabei bewertete Zeitart entspricht der beeinflussbaren Tätigkeitszeit (t_{tb}). Diese umfasst jene Tätigkeitsanteile, die der Mitarbeiter je nach Grad seines Könnens und Einsatzes verkürzen oder verlängern kann. [REFA97; DEUS12, S. 100] Im Gegensatz dazu basiert die REFA-Zeitermittlung auf der direkten Messung von Ist-Zeiten, die durch Zeitstudien oder Multimomentaufnahmen erfasst, zur Normalzeit normiert und anschließend unter Berücksichtigung von Zuschlägen zur Soll- bzw. Vorgabezeit verdichtet werden [REFA78, S. 81]. MTM ist das am weitesten verbreitete System zur zeitlichen Bewertung manueller Tätigkeiten in verschiedenen Detaillierungsgraden und wird häufig in der Planung und Gestaltung von Montageprozessen eingesetzt [BULL86, S. 111; KONO09, S. 112; DEUS12, S. 100].

Im Rahmen der Ablaufanalyse werden die elementaren Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen in Time Measurement Units (TMU) gemessen, wobei 1 TMU 0,036 Sekunden entspricht [DEUS12, S. 100]. Die Analyse der

Montageprozesse erfolgt in drei Schritten: Zerlegung in Bewegungselemente, Bestimmung der Sollzeiten anhand von MTM-Normzeitwertkarten und Synthese der Einzelzeiten zur Gesamtzeit der Montageprozesse [DEUS12, S. 103]. MTM-Normzeitwertkarten enthalten alphanumerische Codes, die standardisierte Bewegungsabläufe repräsentieren und neben einer Kurzbeschreibung der zugrundeliegenden Tätigkeit auch relevante Einflussgrößen wie Bewegungslänge, Greif- und Fügebedingungen (z. B. enge oder lose Passung) sowie den zugehörigen Zeitwert in TMU angeben. Zur Effizienzsteigerung bei der Zeitermittlung gibt es spezielle Software wie etwa TiCon.

MTM wird in verschiedene Bausteinsysteme unterteilt, die je nach Methodenniveau der Montageoperation bzw. dem Prozesstyp, wie in Abbildung 2-7 dargestellt, ausgewählt werden [DEUS12, S. 100]. Die Bausteinsysteme von MTM umfassen das MTM-Grundverfahren, darunter MTM-1, MTM-Standarddaten, MTM-2, das MTM-Universelle Analysiersystem (UAS) sowie MTM für Einzel- und Kleinserienfertigung (MEK) [ARND21, S. 1668].

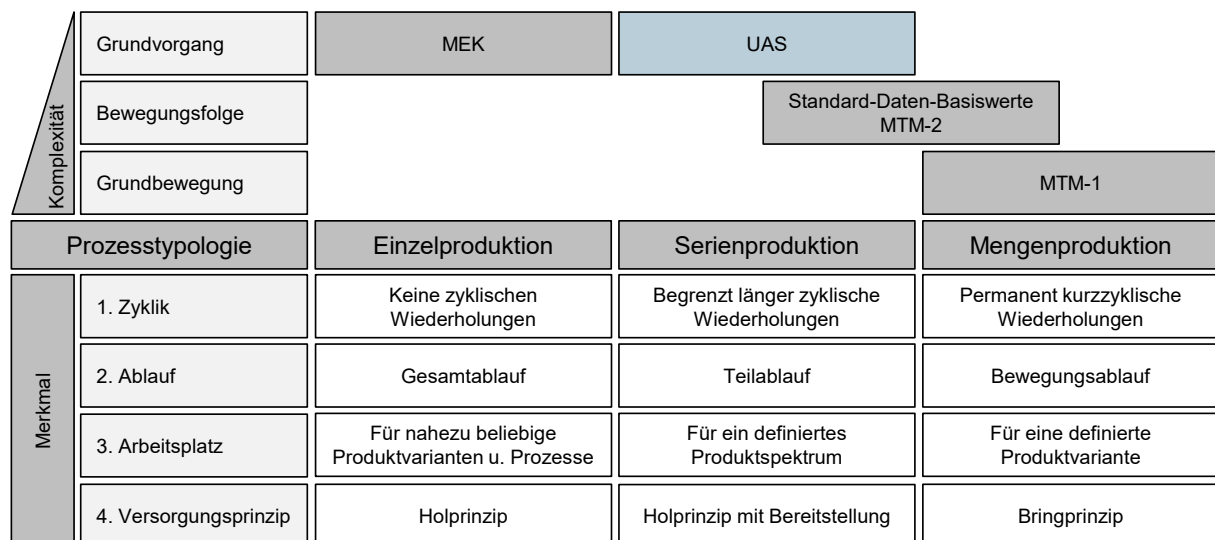


Abbildung 2-7: Übersicht und Einordnung der MTM-Prozessbausteine im Kontext der Prozesstypologie (eigene Darstellung in Anlehnung an BOKR12, S. 101)

Durch Kombination und Verdichtung der Grundbewegungen in höher aggregierte Bausteine wie dem MTM-UAS können komplexere Tätigkeiten effizient analysiert und zeitlich bewertet werden [DEUS12, S. 102]. Abbildung 2-8 zeigt die schrittweise Verdichtung ausgehend von MTM-1 Grundverfahren, über MTM-Standard-Daten-Basiswerte bis zum MTM-UAS und MTM-MEK.

Das MTM-UAS bietet die größten Vorteile für die industrielle Montage, da es einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Analyseaufwand bietet [BULL86, S. 111]. Es wird in UAS-Grundvorgänge und UAS-Standardvorgänge unterteilt, die durch ihre Kombination die meisten in der industriellen Montage typischen Tätigkeiten abdecken können [DEUS12, S. 102]. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf den häufig vorkommenden Bewegungen des Aufnehmens und Platzierens, die im MTM-UAS als

kombinierte Grundvorgänge beschrieben werden. Diese Bewegungen sind zentral für viele Montageprozesse und bieten durch ihre Kombination in UAS-Standardvorgängen eine effiziente Möglichkeit zur zeitlichen Bewertung und Analyse von Montageprozessen.

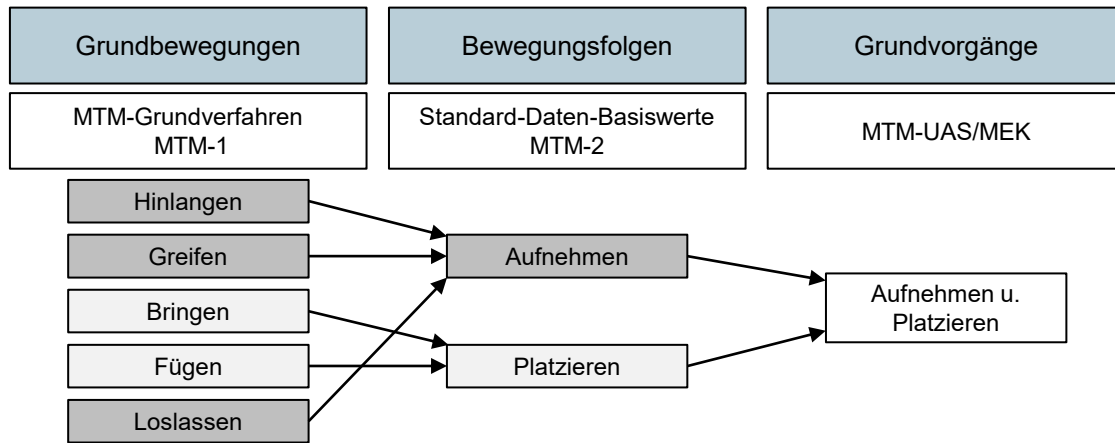


Abbildung 2-8: Verdichtungskette des MTM-Prozessbausteinsystems (eigene Darstellung in Anlehnung an BOKR12, S. 100; DEUS12, S. 102)

MTM ermöglicht eine präzise Vorgabezeitermittlung durch die detaillierte Analyse von Bewegungsabläufen. Diese Zeiten sind jedoch als Normalzeiten auf Basis der MTM-Normalleistung zu verstehen und können in der Praxis durch individuelle Faktoren wie Geschicklichkeit, Motivation, Ermüdung und tageszeitabhängige Leistungsschwankungen der Mitarbeiter variieren. [DEUS12, S. 97] Die Ermittlung fundierter Soll- und Vorgabezeiten ist entscheidend für die effiziente Gestaltung und Planung von Montageprozessen. Dennoch reicht die alleinige Optimierung dieser Zeiten nicht aus, um den vielfältigen Herausforderungen in modernen Produktionsumgebungen gerecht zu werden. Insbesondere die zunehmende Komplexität und Dynamik der Märkte erfordert von Montagesystemen nicht nur zeitliche Effizienz, sondern auch eine hohe Anpassungsfähigkeit. Um den Anforderungen wechselnder Produktvarianten und Stückzahlen gerecht zu werden, müssen Montagesysteme flexibel und wandlungsfähig sein. In diesem Kontext wird im folgenden Kapitel die Bedeutung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen beleuchtet.

2.2.3 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen

Externe Störgrößen aus der Produktionsumgebung erzeugen ein turbulentes Umfeld, das durch sich überlagernde und verstärkende Faktoren einen hohen Veränderungsdruck auf Produktionssysteme ausübt [CISE02, S. 441–442; NYHU08, S. 21]. Diese Faktoren werden als interne und externe Wandlungstreiber bezeichnet [ELMA09a, S. 8]. Externe Wandlungstreiber resultieren vor allem aus Marktveränderungen, wie etwa Schwankungen in der Kundennachfrage. Interne Wandlungstreiber hingegen sind unternehmensinterne Faktoren, wie beispielsweise Qualitäts- und Effizienzsteigerungsbestrebungen oder strategische Entwicklungsziele, die unabhängig von äußeren

Einflüssen verfolgt werden. [ELMA09a, S. 8; EILE15, S. 17] Daraus ergeben sich, wie in Abbildung 2-9 dargestellt, drei Hauptkategorien von direkten Wandlungstreibern, die das Montagesystem unmittelbar beeinflussen: Produktveränderungen, Stückzahlveränderungen und Änderungen der Montagetechnologie [EILE15, S. 17].

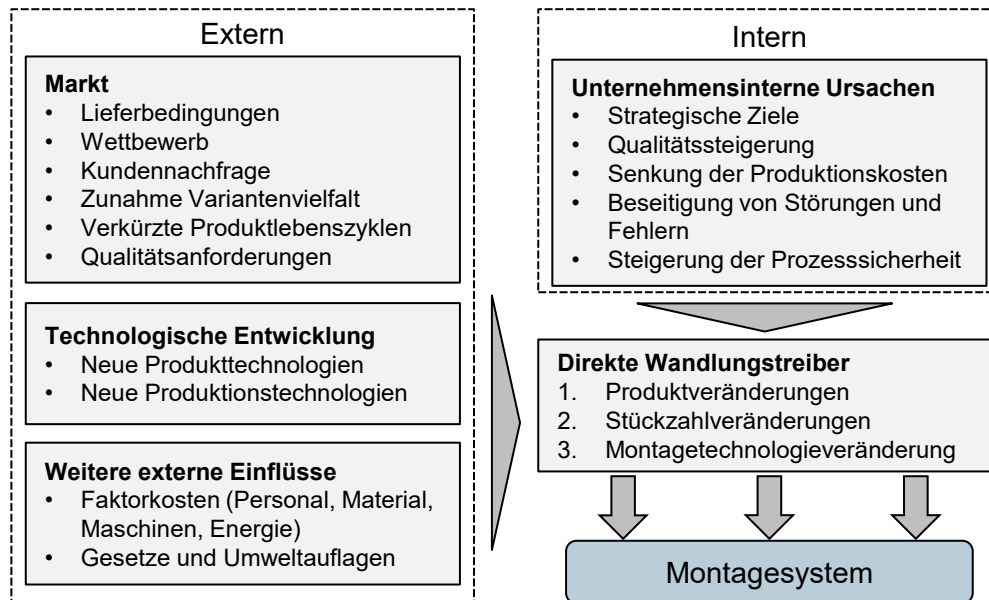


Abbildung 2-9: Wandlungstreiber mit Auswirkung auf Montagesysteme (eigene Darstellung in Anlehnung an EILE15, S. 18)

Der Wandlungstreiber Produktveränderung umfasst Anpassungen der Produktstruktur, die sich direkt auf die Prozess- und Montagesystemgestaltung auswirken [MUEL11a, S. 432–433; MUEL11b, S. 601]. Ursachen hierfür können Produktmodifizierungen oder die Einführung neuer Produktvarianten sein. Stückzahlveränderungen erfordern häufig eine Anpassung der Produktionskapazität, was wiederum zu Änderungen in der Struktur des Montagesystems sowie zu Anpassungen der Anordnung und Organisation führen kann. [EILE15, S. 18] Unabhängig von Produkt- oder Stückzahlveränderungen kann auch eine Anpassung der Montagetechnologie erforderlich werden, z. B. zur Qualitätssteigerung [MUEL11b, S. 601]. Weitere Gründe für die Änderung einer Montagetechnologie können gesetzliche Vorgaben, steigende Lohnkosten oder Richtlinien zur Ressourceneinsparung sein. Im Rahmen dieser Dissertation ist insbesondere der Wandlungstreiber Produktveränderung relevant, da er die primäre Herausforderung für den Einsatz Kognitiver Assistenzsysteme darstellt.

Die beschriebenen Wandlungstreiber zwingen produzierende Unternehmen zu einer kontinuierlichen internen Anpassung des gesamten Montagesystems [WEST16, S. 107]. In der Literatur werden in diesem Zusammenhang zwei wesentliche Formen der Veränderungsfähigkeit unterschieden: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.

Flexibilität bedeutet, dass ein Montagesystem im Rahmen eines vorgehaltenen Fähigkeitsbereichs (bzw. -korridors) von Merkmalen sowie deren Ausprägungen reversibel

an veränderte Gegebenheiten anpassbar ist [WEST00, S. 24; NYHU08, S. 24]. Die erreichbaren Systemzustände werden dabei zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung festgelegt. In einem flexiblen Montagesystem können somit beispielweise verschiedene Produktvarianten ohne Umrüsten oder Umtakten montiert werden. [EILE15, S. 19]

Wandlungsfähige Montagesysteme sind in der Lage sowohl interne als auch externe Veränderungsimpulse, wie z. B. einen erheblichen Anstieg der Stück- oder Variantenanzahl, nicht nur innerhalb eines vorgehaltenen Korridors aufzufangen, sondern diese Korridore innerhalb eines vorgedachten Lösungsraums selbst flexibel zu verschieben [NYHU08, S. 14; WIEN14, S. 128]. Erweiterungs- oder Anpassungsinvestitionen werden erst zum Ausbaupunkt (bei tatsächlichem Bedarf) getätigt, um eine Überdimensionierung im Vorfeld zu vermeiden. Hierdurch erfolgt eine explizite Entkopplung des Montagesystemlebenszyklus vom Lebenszyklus des zu montierenden Produkts, da der Lebenszyklus des Montagesystems in der Regel deutlich länger ist als der des Produkts. [MUEL11a, S. 426–427]

In Abbildung 2-10 ist die Veränderung eines Montagesystems in Bezug auf bestimmte Veränderungsdimensionen dargestellt.

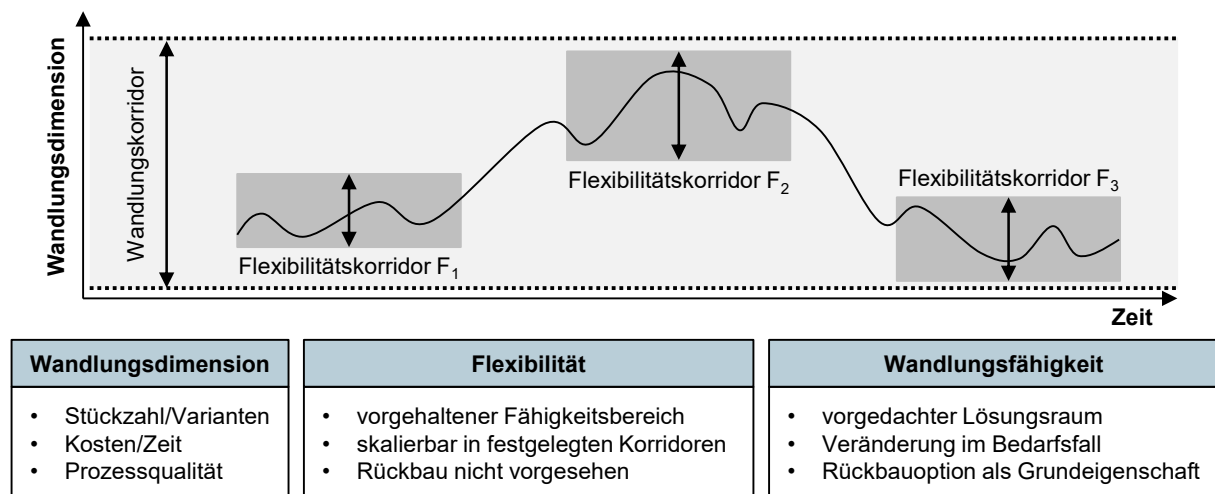


Abbildung 2-10: Unterscheidung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (eigene Darstellung in Anlehnung an ZAEH05, S. 4, WIEN14, S. 129)

Solange die Veränderungsimpulse im Rahmen des vorgehaltenen Flexibilitätskorridors (F1 bis F3) bleiben, erfolgt die Anpassung innerhalb des Systems ohne Umbau oder Rückbau. Überschreiten die Impulse diesen Korridor, ist ein Wandel des Systems erforderlich, der innerhalb eines vorgedachten Lösungsraums – in Abbildung 2-10 als Wandlungskorridor bezeichnet – erfolgt. [WIEN14, S. 128]

Der Wandlungskorridor wird durch Rekonfigurationen erschlossen, d.h. durch die Möglichkeit, ein Montagesystem durch Austausch, Hinzufügen oder Eliminieren von Prozessmodulen und Betriebsmitteln an veränderte Bedingungen anzupassen [WIEN07,

S. 786; MUEL11a, S. 426]. Zur Realisierung der Wandlungsfähigkeit muss das Montagesystem über Eigenschaften verfügen, die es zum Wandel befähigen [NYHU08, S. 26]. Diese Eigenschaften sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Übersicht und Erklärung der Wandlungsbefähiger (eigene Darstellung in Anlehnung an WIEN14, S. 133)

Wandlungsbefähiger	Beschreibung
Mobilität	örtlich weitgehend uneingeschränkte Beweglichkeit von Objekten
Universalität	Dimensionierung und Gestaltung für verschiedene Anforderungen hinsichtlich der Produkte oder Technologien sowie die Weiterbildung von Menschen zur Bewältigung dieser
Kompatibilität	Vernetzungsfähigkeit bezüglich Material, Information, Medien und Energie, wie z. B. einheitliche Softwareschnittstellen
Modularität	standardisierte, funktionsfähige Einheiten oder Elemente für den einfachen Austausch
Skalierbarkeit	technische, räumliche und personelle Erweiter- und Reduzierbarkeit

Es ist zu beachten, dass einige dieser Wandlungsbefähiger in direktem Zusammenhang stehen und sich gegenseitig bedingen. Universalität und Kompatibilität sind z. B. eine Voraussetzung für Modularität [SCHO18, S. 6]. In dieser Dissertation werden die Wandlungsbefähiger gezielt kombiniert, um KAS bzw. Montageanweisungen so zu gestalten, dass sie aktiv zur Wandlungsfähigkeit des Montagesystems beitragen. Mobilität als uneingeschränkte Beweglichkeit von Objekten ist in diesem Kontext nicht relevant und wird daher nicht weiter berücksichtigt.

2.3 Kognitive Assistenzsysteme

Nachdem in Kapitel 2.2 die wesentlichen Aspekte und Zusammenhänge von Montagesystemen erläutert wurden, werden in diesem Kapitel KAS näher betrachtet. Zunächst erfolgt eine umfassende Definition und Beschreibung der Funktionsweise von KAS, gefolgt von einer Beschreibung ihrer Einsatzmöglichkeiten und verschiedener Ausgabeeinheiten. Dabei wird die Bedeutung von KAS im Kontext moderner Montagesysteme erläutert und die Herausforderungen und Potenziale ihrer Implementierung im Hinblick auf die Zielsetzung der Dissertation aufgezeigt.

2.3.1 Definition und Funktionsweise von Kognitiven Assistenzsystemen

Das Wort „Assistenz“ leitet sich vom lateinischen „assistere“ ab, was „beistehen“ oder „unterstützen“ bedeutet [DUDE24]. Ein System ist die Gesamtheit von miteinander in Beziehung stehenden Elementen, die in einem bestimmten Kontext als Ganzes und

von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden [DIN14, S. 21]. Unter Assistenzsystemen sind demnach alle Systeme zu verstehen, die den Mitarbeiter bzw. den Werker bei seinen Handlungen unterstützen. Dabei können sie, wie in Abbildung 2-11 dargestellt, analog zu den Phasen der menschlichen Informationsverarbeitung auf der Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Ausführungsebene ansetzen. Während Wahrnehmungs- und Entscheidungsassistenzsysteme kognitive Unterstützung bieten, leisten Ausführungsassistenzsysteme physische Unterstützung. [BENG17, S. 57]

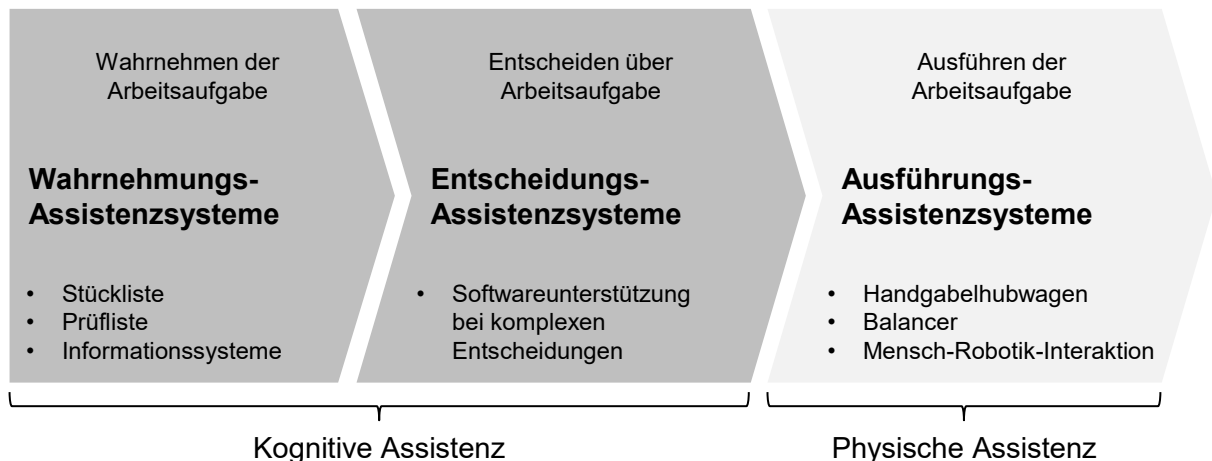


Abbildung 2-11: Taxonomie der Assistenzsysteme (eigene Darstellung in Anlehnung an BENG17, S. 57)

Wahrnehmungsassistenzsysteme helfen bei der Erfassung von Informationen zur Arbeitsaufgabe, z. B. durch Stücklisten oder Informationssysteme, die dem Werker notwendige Anweisungen liefern. Entscheidungsassistenzsysteme unterstützen bei der Bewältigung komplexer Entscheidungen, häufig durch Softwarelösungen, die Analysen und Vorschläge ausgeben. Ausführungsassistenzsysteme bieten physische Unterstützung bei der Arbeitsausführung. Diese reichen von einfachen Geräten wie Handgabelhubwagen bis hin zu kollaborativen Robotersystemen, die die körperliche Belastung der Werker verringern. [BENG17, S. 57–58]

Das übergeordnete Ziel von Assistenzsystemen ist es, die Diskrepanz zwischen der menschlichen Leistungsfähigkeit sowie -fertigkeit und den Anforderungen der Arbeitsaufgabe zu minimieren. Dadurch soll die Produktivität der Werker und des gesamten Arbeitssystems gesteigert werden. [HOLD16, S. 296] KAS fokussieren sich insbesondere auf die kognitive Entlastung der Werker, was zu geringeren Zeitverlusten und weniger Montagefehlern führt, den Anlernprozess verkürzt und so eine höhere Produktqualität gewährleistet [UNRA16, S. 367; BLAE21, S. 147]. Der Schwerpunkt Kognitiver Assistenzsysteme liegt in erster Linie auf der Unterstützung der Entscheidungsfindung. Dabei stehen zwei Aspekte im Vordergrund. Zum einen sollen Fehlentscheidungen vermieden werden, wie z. B. das unbeabsichtigte Montieren eines nicht vorgesehenen Bauteils. Zum anderen soll die Entscheidungsfindung beschleunigt

werden, so dass anschließende Handlungen zügiger ausgeführt werden können. [BASH23, S. 23]

KAS fungieren in Montagestationen, wie in Abbildung 2-12 dargestellt, als Schnittstelle zwischen Werker und Montageoperation. Nach DIN EN ISO 6385 zählen sie zu den Arbeitsmitteln, die wiederum als eine Teilmenge der Betriebsmittel betrachtet werden können [DIN04; TEUB21, S. 24].

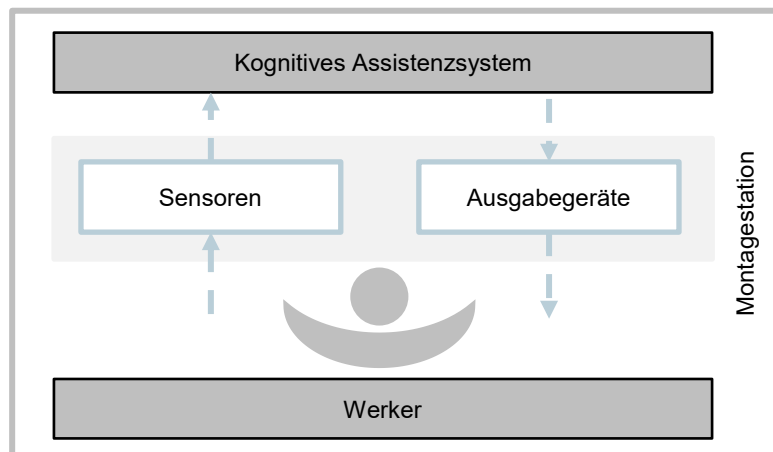


Abbildung 2-12: Technischer Aufbau KAS (eigene Darstellung in Anlehnung an DOLL14, S. 343)

KAS sind technisch so aufgebaut, dass sie Informationen und Eingaben des Werkers mithilfe von Sensoren erfassen. Diese Sensoren nehmen sowohl Reaktionen des Werkers als auch Veränderungen in der Umgebung und bei den Montageoperationen wahr. Die Steuerungseinheit des KAS verarbeitet diese Informationen, greift auf interne und externe Datenquellen zurück und erzeugt darauf basierend geeignete Ausgaben, die über Ausgabegeräte an den Werker übermittelt werden. So entsteht ein kontinuierlicher Informationsfluss zwischen Werker und System, durch den die Arbeitsumgebung gezielt unterstützt und optimiert wird. [TEUB16, S. 351]

Auf Grundlage der vorangehenden Beschreibungen und in Anlehnung an CLAEYS ET AL., HINRICHSSEN ET AL. und MERKEL werden KAS im Rahmen der vorliegenden Dissertation wie folgt definiert:

Kognitive Assistenzsysteme sind IT-Systeme, die aus Hard- und Softwarekomponenten bestehen, Daten über Sensoren und Eingaben aufnehmen und verarbeiten, um Werkern die richtigen Informationen („was“) zur richtigen Zeit („wann“) und in der gewünschten Form („wie“) zur Verfügung zu stellen und sie damit bei der Entscheidungsfindung und Ausführung definierter Arbeitsaufgaben unterstützen [CLAE15, S. 924; HINR16, S. 5; MERK21, S. 15].

KAS führen den Werker Schritt für Schritt durch den Montageprozess, indem nach jeder Montageoperation die Inhalte der nächsten Montageoperation angezeigt werden

[HINR20, S. 28]. Dadurch können Montageanweisungen und -informationen zur Tätigkeitsausführung automatisch mit dem Arbeitsfortschritt des Werkers synchronisiert werden – in vielen Fällen ohne explizite manuelle Rückmeldung an das System. Allerdings existieren auch Systeme, bei denen die Rückmeldung durch den Werker manuell erfolgt oder als zusätzliche Bestätigung vorgesehen ist. Die korrekte Auswahl der Bauteile sowie der Einsatz der richtigen Betriebsmittel und Werkzeuge werden nahezu in Echtzeit sensor- und kameragestützt überwacht. [HOLD20, S. 2] Dabei überprüfen und protokollieren KAS die ordnungsgemäße Durchführung der Montageoperationen [BOVE20, S. 2].

Für die Umsetzung dieser Unterstützung sind Informationsübertragungen zwischen Mensch und Maschine notwendig, die als Assistenzfunktionen bezeichnet werden. Eine Assistenzfunktion beschreibt in diesem Zusammenhang technologie-neutral die spezifische Informationsein- und -ausgabe eines Kognitiven Assistenzsystems zur Unterstützung des Werkers [MERK21, S. 55]. Dabei werden verschiedene Modalitäten der Sinneswahrnehmung als Kanäle zur Informationsein- und -ausgabe genutzt. Die Informationsausgabe kann, wie in Abbildung 2-13 dargestellt, optisch und akustisch erfolgen. Die Informationseingabe kann manuell, verbal, gestikulär sowie durch Bewegungsdaten umgesetzt werden. [SCHL18, S. 432]

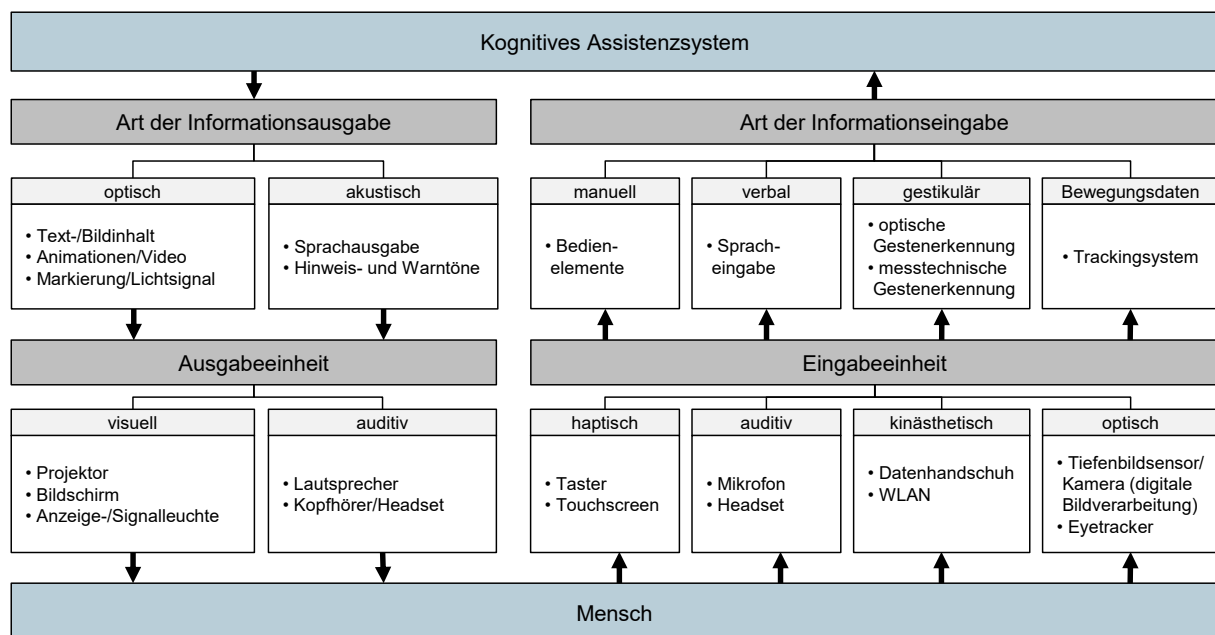


Abbildung 2-13: Morphologie der Informationsübertragung zwischen Mensch und Kognitivem Assistenzsystem (eigene Darstellung in Anlehnung an UNRA16, S. 367; SCHL18, S. 432)

2.3.2 Technologien und Trends

Die Ausabeeinheiten in KAS sind dafür verantwortlich, Montageanweisungen an den Werker zu übermitteln. Montageanweisungen sollen Informationen über den Monteauftrag und -ablauf so darstellen, dass der Werker sie sensorisch leicht aufnehmen und verarbeiten kann. Ihr Ziel besteht darin, eine effektive Fehlervermeidung und eine

effiziente Auftragsbearbeitung mit geringer Ausführungszeit zu gewährleisten. Gleichzeitig sollen die Anweisungen von den Werkern als nützlich empfunden werden, d.h. eine hohe Gebrauchstauglichkeit aufweisen. [HINR21, S. 92–93]

Die Erstellung und Aktualisierung von Montageanweisungen ist in den meisten Unternehmen Aufgabe der Arbeitsvorbereitung [LANG07, S. 31]. Montageanweisungen können verschiedene Informationsbereitstellungsarten wie Textanweisungen, Bilder, Videos bzw. Animationen, projizierte Konturen [FUNK15b, S. 2], akustische Informationen, Zeit- und Prozessfortschrittsanzeigen oder eine Kombination davon umfassen [SOCH19, S. 930].

Zur Bereitstellung von Montageanweisungen stehen grundsätzlich verschiedene Ausgabeinheiten zur Verfügung, wie Papier, Tablets/Bildschirme, Head-Mounted Displays (HMDs) und In-situ-Projektionen [FUNK16, S. 934]. HMDs sind tragbare Geräte, die am Kopf getragen werden und digitale Informationen entweder auf einem augen-nahen Bildschirm anzeigen oder direkt auf die Netzhaut projizieren. In-situ-Projektion bezeichnet eine Technik, bei der Informationen direkt im Arbeitsbereich angezeigt werden, insbesondere in unmittelbarer Nähe oder direkt auf den Werkstücken selbst [BESG18, S. 857]. Diese Technik findet Anwendung in sogenannten Spatial Augmented Reality (SAR)-Systemen. SAR ist eine Form der erweiterten Realität, auch als Augmented Reality (AR) bekannt, bei der digitale Inhalte direkt auf physische Objekte in der realen Welt projiziert werden, anstatt sie auf einem Display wie einem Smartphone oder einer AR-Brille anzuzeigen. SAR-Systeme nutzen Projektoren, die typischerweise über dem jeweiligen Objekt, etwa einer Montagestation, angebracht sind. So können relevante Montageinformationen direkt auf der Arbeitsfläche dargestellt werden. [RUPP21, S. 37] Eine in der Industrie weit verbreitete Form der In-situ-Projektion sind Pick-/ Place-by-Light-Lösungen. Diese zeigen durch Lichtpunkte (alternativ auch durch komplexere Projektionen, Bildschirminformationen oder Signalleuchten) an, welches Teil wo entnommen und/oder platziert werden muss. [BOVE20, S. 3]

In der industriellen Praxis zeigt sich, dass der Einsatz papierbasierter Montageanweisungen aufgrund der zunehmenden Komplexität und Dynamik von Montageprozessen den Anforderungen an eine zielgerichtete Informationsbereitstellung nicht mehr gerecht wird [FRAN09, S. 822]. KAS unter Verwendung digitaler Ausgabeinheiten sind insbesondere dann sinnvoll, wenn die Arbeitsumgebung durch eine hohe Informationsdichte gekennzeichnet ist – etwa bei einer Vielzahl von Varianten und Komponenten oder bei häufigen Änderungen der Informationsbasis infolge neuer oder geänderter Produktvarianten [BORN18, S. 273]. Die dadurch steigende kognitive Belastung und das erhöhte Risiko von Montagefehlern erfordern den Einsatz von KAS, insbesondere in Umgebungen mit kleinen Losgrößen oder selten montierten Produkten [WOLF19, S. 7; SEHR21, S. 1].

Das Potenzial Kognitiver Assistenzsysteme wird nicht nur in der Wissenschaft, sondern zunehmend auch in der Industrie erkannt, was sich in einer wachsenden

Zahlkommerzieller Anbieter für diese Systeme in den letzten Jahren widerspiegelt. Sowohl etablierte Hersteller von Produktionstechnik, die ihre Hardware verstärkt durch spezialisierte Software ergänzen, als auch softwaregetriebene Start-ups drängen mit Systemlösungen für KAS auf den Markt. Diese Vielfalt und Dynamik erschwert einen klaren Marktüberblick. Um einen besseren Marktüberblick zu erhalten wurde eine umfassende Marktrecherche durchgeführt. Diese ist im Anhang A dargestellt und zeigt in Tabelle A-1 eine Auswahl aktueller KAS am Markt, deren Funktionen und die jeweiligen Anbieter. Des Weiteren sind die Lösungen zur Montageanweisungserstellung in Tabelle A-2 aufgeführt. Die beiden Tabellen bieten eine strukturierte Darstellung der verfügbaren Lösungen und ermöglichen einen direkten Vergleich der Systeme hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten.

Trotz der dynamischen Marktentwicklung und der zunehmenden Vielfalt verfügbarer KAS lassen sich Defizite und Entwicklungstrends erkennen. Ein zentrales Problem ist die ineffiziente und kostenintensive Erstellung von Montageanweisungen [LANG07, S. 73; LUŠI17, S. 3]. In der Praxis erfolgt die Gestaltung und Erstellung dieser Anweisungen in der Regel vollständig manuell. Dabei werden häufig frei formulierte Texte verwendet, die ohne einheitliche Struktur in die Anweisungen eingetragen und oftmals mit qualitativ unzureichenden Abbildungen ergänzt werden. [LANG07, S. 74]

Zudem bieten viele der derzeit auf dem Markt befindlichen KAS nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Individualisierung. Je stärker die Systeme auf die individuellen Fähigkeiten, Präferenzen und Bedürfnisse der Werker abgestimmt sind, desto effektiver und kompetenzgerechter kann die Unterstützung erfolgen [BOVE20, S. 1]. Eine menschenzentrierte Gestaltung der KAS ist daher entscheidend, um diesen Anforderungen gerecht zu werden [BORN18, S. 273]. Darüber hinaus soll eine solche menschenzentrierte Gestaltung die Produktivität steigern und die Kosten für Schulung und Betreuung im Umgang mit KAS reduzieren [MERK21, S. 22]. Voraussetzung dafür ist ein partizipativer Gestaltungs- und Einführungsprozess, der in enger Abstimmung zwischen den Betriebsparteien erfolgt [KLEI17, S. 37]. Denn die Akzeptanz durch die Werker ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Einführung von KAS [SOCH19, S. 927]. Dabei ist insbesondere die Kompetenz der Werker zu berücksichtigen. Selbst bei hoher Fachkompetenz kann eine hohe mentale Belastung, die zu wiederkehrenden Fehlern und Qualitätseinbußen führt, die Einführung eines Assistenzsystems auch aus Sicht des Werkers sinnvoll erscheinen lassen [BORN18, S. 273]. Die erfolgreiche Implementierung von KAS hängt somit nicht nur von technischer Funktionalität, sondern maßgeblich von der Berücksichtigung menschlicher Faktoren ab. Das folgende Kapitel widmet sich daher arbeitswissenschaftlichen Aspekten in der Montage, die für eine kompetenzgerechte und ergonomische Gestaltung von Assistenzsystemen von zentraler Bedeutung sind.

2.4 Arbeitswissenschaftliche Betrachtung des Menschen in der Montage

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert, ist der Mensch aufgrund seiner kognitiven und motorischen Fähigkeiten automatisierten Montagesystemen hinsichtlich Flexibilität und Anpassungsfähigkeit überlegen [ZAEH09, S. 355; HASL18, S. 48] und damit der zentrale Akteur in der manuellen Montage. Der daraus resultierende Paradigmenwechsel manifestiert sich in einer zunehmenden Abkehr von technikzentrierten hin zu menschenzentrierten Ansätzen in der Gestaltung und dem Betrieb von Montagesystemen [MAY15, S. 103]. Ein menschenzentriertes Montagesystem reagiert dabei auf die individuellen Merkmale und Eigenschaften des einzelnen Nutzers. Diese lassen sich in vier Dimensionen unterteilen: Anthropometrie, funktionale Fähigkeiten (physisch, sensorisch, kognitiv), Wissen und persönliche Bedürfnisse. [MAY15, S. 106–107] KAS bilden das technische Pendant zu den Dimensionen „funktionale Fähigkeiten“ und „Wissen“ und sind damit ein zentraler Bestandteil menschenzentrierter Systeme. Sie unterstützen die kognitiven Prozesse des Werkers wie die Wahrnehmung und Informationsverarbeitung und erleichtern dadurch die Entscheidungsfindung und Handlungsplanung. Dies verdeutlicht, dass die Entwicklung eines KAS zur Unterstützung der kognitiven Fähigkeiten des Menschen nicht ausschließlich einer technologische Betrachtung bedarf. Vielmehr handelt es sich um die Konzeption eines soziotechnischen Systems, wie es bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben wurde, das eine enge Kooperation zwischen dem Menschen und der Assistenztechnologie voraussetzt. In diesem Kapitel wird daher der Faktor Mensch in der Montage detaillierter betrachtet, um die Rolle und Funktionsweise von KAS im Kontext der Mensch-Technik-Interaktion zu vertiefen. Hierzu werden in diesem Kapitel die Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung, die Informationsverarbeitung, das Lernverhalten und der Kompetenzbegriff näher beschrieben.

2.4.1 Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung

Menschliche Eigenschaften, die zur Erbringung von Leistung befähigen, setzen sich aus verschiedenen Bestimmungsgrößen zusammen, die zeitlichen Veränderungen unterliegen können und durch Arbeitsgestaltung oder den Einsatz von KAS beeinflusst werden. Die Bestimmungsgrößen sind in Abbildung 2-14 dargestellt.

Sie beziehen sich sowohl auf die individuelle Konstitution und Disposition, als auch auf die Qualifikation und Kompetenz von Menschen und sind im Hinblick auf die Gestaltung von KAS wichtig zu verstehen. Konstitutionsmerkmale umfassen die unveränderlichen Eigenschaften des Menschen, die sich während des Lebenszyklus nicht ändern, wie Geschlecht, Körperbau, Kulturkreis und Erbanlagen [SCHL18, S. 60]. Dispositionsmerkmale sind Eigenschaften, die zwar relativ konstant, aber im Laufe der Zeit veränderbar sind, ohne dass der Mensch direkt darauf Einfluss nehmen kann. Dazu zählen Merkmale wie Persönlichkeit, Alter, Intelligenz, Körpergewicht, Gesundheitszustand und rhythmologische Einflüsse [SCHL18, S. 75]. Anpassungsmerkmale

betreffen die menschliche Reaktion auf physische, mentale und emotionale Belastungen am Arbeitsplatz. Dazu zählen Beanspruchung, Ermüdung, Motivation, Zufriedenheit und Stimmung. [SCHL18, S. 118]

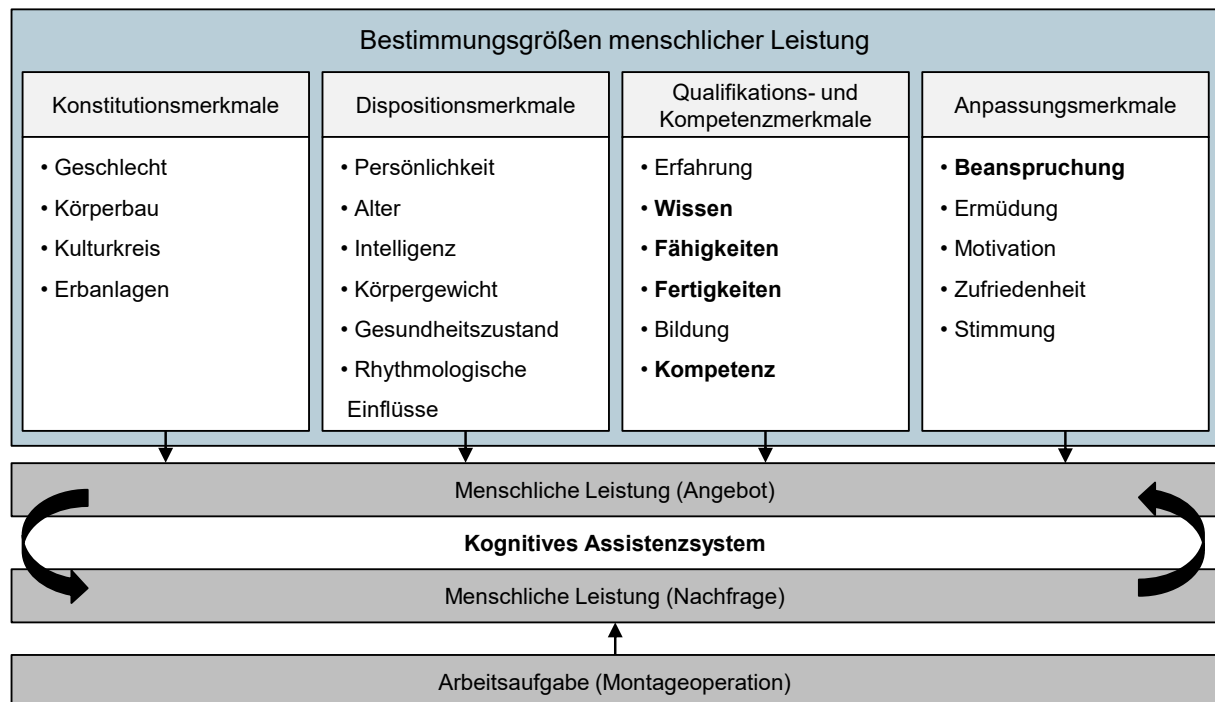


Abbildung 2-14: Individuelle Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung (eigene Darstellung in Anlehnung an SCHL18, S. 61; HOLD20, S. 79)

Qualifikations- und Kompetenzmerkmale hingegen sind die durch Lernprozesse erworbenen Eigenschaften, die kurz-, mittel- und langfristig veränderbar sind. Zu diesen Merkmalen gehören Erfahrung, Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Bildung und Kompetenz. [SCHL18, S. 109]

KAS können in diesem Kontext als Ausgleichselement zwischen der durch die Arbeitsaufgabe geforderten menschlichen Leistung (Nachfrage) und dem individuell verfügbaren Leistungspotenzial (Angebot) betrachtet werden. In diesem Zusammenhang spielt die menschliche Informationsverarbeitung eine zentrale Rolle, die im folgenden Kapitel näher erläutert wird.

2.4.2 Menschliche Informationsverarbeitung

Zur Beschreibung des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses gibt es verschiedene Modelle, die die beteiligten Funktionselemente und Abläufe darstellen. Sequenzielle Modelle der Informationsverarbeitung skizzieren dabei den Fluss von Informationen durch den Organismus, beginnend mit einem wahrgenommenen Reiz bis hin zur Ausführung einer Reaktion. Diese Modelle gehen davon aus, dass mehrere aufeinanderfolgende Verarbeitungsstufen durchlaufen werden, wobei jede Stufe eine gewisse Verarbeitungszeit benötigt, weshalb diese Modelle auch als Stufenmodelle bezeichnet werden. [SCHL18, S. 187]

In der manuellen Montage, in der die Werker die Montageoperationen selbst ausführen, folgt der Prozess der Informationsverarbeitung, wie in Abbildung 2-15 dargestellt, immer einem ähnlichen, sequenziellen Muster. Die ersten beiden Schritte, Sensorik und Wahrnehmung (Perzeption), gehören zur Phase der Wahrnehmung der Arbeitsaufgabe. Die Sensorik ermöglicht die Informationsaufnahme über die Sinne – wie Licht, Schall oder Druck – während die Wahrnehmung diese aufgenommenen Reize filtert, verdichtet und interpretiert. Der Mensch nimmt ca. 10 Mbits/s über den visuellen Kanal auf, was etwa 80% seiner gesamten Informationsaufnahme entspricht [ZUEH12, S. 7]. Daher liegt der Schwerpunkt dieser Dissertation auf der optischen Informationsbereitstellung durch KAS, um die Sinnesmodalität „Sehen“ zielgerichtet zu nutzen und zu unterstützen.

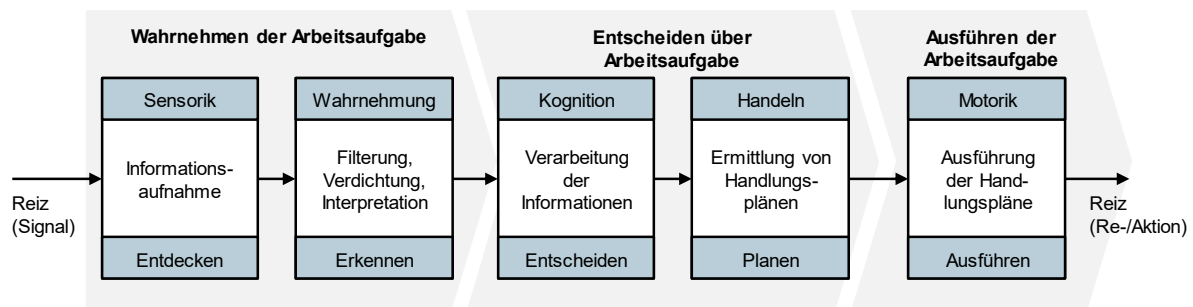


Abbildung 2-15: Sequenzielles Ablaufmuster menschlicher Informationsverarbeitung in der manuellen Montage (eigene Darstellung in Anlehnung an LUCZ93, S. 13; ZUEH12, S. 6)

Die nächste Phase umfasst die Entscheidung über die Arbeitsaufgabe, die die Schritte Kognition und Handeln miteinander vereint. Hierbei wird das erkannte Signal durch kombinatorische und kreative Denkleistungen verarbeitet und eine entsprechende Reaktion zugeordnet [LUCZ93, S. 14]. Die zielgerichtete Verarbeitung der Informationen führt zur Entwicklung von Problemlösungsstrategien. Auf Grundlage der verfügbaren Informationen werden geeignete Handlungen ermittelt und in konkrete Handlungspläne überführt. [ZUEH12, S. 6]

In der letzten Phase erfolgt die Ausführung der Arbeitsaufgabe. Hier übernimmt die Motorik die physische Umsetzung der Handlungspläne, z. B. durch Bewegungen der Hand, des Fußes oder durch die Stimme [ZUEH12, S. 6]. Die geplanten Handlungen werden durch motorische Tätigkeiten, wie z. B. das Verschrauben von Bauteilen, ausgeführt [LUCZ93, S. 14].

Tätigkeiten, bei denen ein enger Zusammenhang zwischen energetisch-motorischen und sensorisch-informativen Leistungsanteilen besteht, ohne dass die Muskelarbeit durch besondere Schwere oder Einseitigkeit gekennzeichnet ist oder die Anforderungen an die Informationsverarbeitung (Erkennen, Entscheiden) besonders hoch sind, werden als sensumotorische Arbeit bezeichnet. Typische Vertreter dieses Arbeitstyps sind manuelle Montageoperationen, bei denen eine präzise Regelung der eingesetzten Aktionskräfte erforderlich ist. [SCHL18, S. 145]

In der kognitionspsychologisch geprägten Aufmerksamkeitstheorie gibt es weitergehende Modellvorstellungen, die nicht den Zeitverbrauch, sondern die Zuweisung „kognitiver Kapazität“ bzw. die Regulation des damit verbundenen „Energieeinsatzes“ betrachten. Vorrangiger Zweck dieser Modelle ist es, einen messtheoretischen Zugang für die Erfassung von mentaler Beanspruchung zu formulieren. [SCHL18, S. 189] Das Informationsverarbeitungsmodell von WICKENS ET AL. integriert neben den Stufen des Verarbeitungsprozesses auch das Arbeits- und Langzeitgedächtnis [WICK00], da davon ausgegangen wird, dass Gedächtnisleistungen an der Mustererkennung und Entscheidungsfindung großen Anteil haben [SCHL18, S. 192].

Eine zentrale Erkenntnis dieser Betrachtungen ist, dass die Informationsaufnahme und -verarbeitung kapazitativ limitiert sind [WICK08, S. 452]. Durch die steigende Variantenvielfalt stellt die komplexe Variantenmontage, die zahlreiche Kombinationen von Montageoperationen mit geringer Wiederholhäufigkeit erfordert, eine besondere Herausforderung dar. Sie erfordert mehr kognitive Ressourcen als die traditionelle Einproduktmontage, da Werker eine größere Menge an Informationen verarbeiten und häufiger Entscheidungen treffen müssen. Dies führt zu einer steigenden kognitiven Belastung, die sich durch unterstützende Maßnahmen wie den Einsatz von KAS verringern lässt. [DOLL14, S. 341; BORN18, S. 270; BLAE21, S. 162; HINR21, S. 92]

Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept erweitert dieses Verständnis. Es unterscheidet zwischen der Belastung, die die äußeren Merkmale der Arbeitssituation umfasst – wie die Arbeitsaufgabe, Zeitdruck oder Umgebungsbedingungen – und der Beanspruchung, die die individuellen Reaktionen des Menschen auf diese Bedingungen beschreibt. Dabei hängt die Beanspruchung nicht nur von der Belastung selbst ab, sondern auch von den individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Einzelnen. [SCHL18, S. 25] Nach DIN EN ISO 10075-1 wird Beanspruchung als unmittelbare Auswirkung der psychischen Belastung des Individuums in Abhängigkeit von seinen jeweiligen überdauernden und akut gegebenen Voraussetzungen beschrieben [DIN18a, S. 7]. Daher kann dieselbe Belastung bei verschiedenen Menschen zu unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus führen [SCHL18, S. 25].

Nachdem die menschliche Informationsverarbeitung sowie die daraus resultierende kognitive Belastung und individuelle Beanspruchung in der manuellen Montage behandelt wurden, richtet sich der Fokus des Folgekapitels auf das menschliche Lernverhalten und den Kompetenzerwerb.

2.4.3 Menschliches Lernverhalten und Kompetenz

Der zeitliche Verlauf des menschlichen Lernprozesses lässt sich mathematisch durch Lernkurven abbilden, die im industriellen Umfeld erstmalig von WRIGHT in der Flugzeugmontage beschrieben wurden [WRIG36]. WRIGHT beobachtete, dass die Produktionskosten – der Einsatz von Kapital, Arbeitskraft und anderen Ressourcen – mit jeder Verdoppelung der Produktionsmenge um einen konstanten Prozentsatz sinken. Zur

mathematischen Modellierung dieses Effekts verwendete er eine Potenzfunktion, die in logarithmierter Form einen linearen Zusammenhang zeigt.

Lernkurven beschreiben allgemein, wie in Abbildung 2-16 dargestellt, den Zusammenhang zwischen der Reduktion der für eine Tätigkeit benötigten Zeit und der Anzahl ihrer Wiederholungen [SCHL18, S. 111]. Der degressive Verlauf der Ausführungszeit nähert sich dabei asymptotisch einem Grenzwert an, wobei der größte Lernfortschritt zu Beginn stattfindet und sich im Laufe der Zeit verlangsamt, bis ein Plateau erreicht wird, an dem kaum noch Verbesserungen erzielt werden [SCHL18, S. 112].

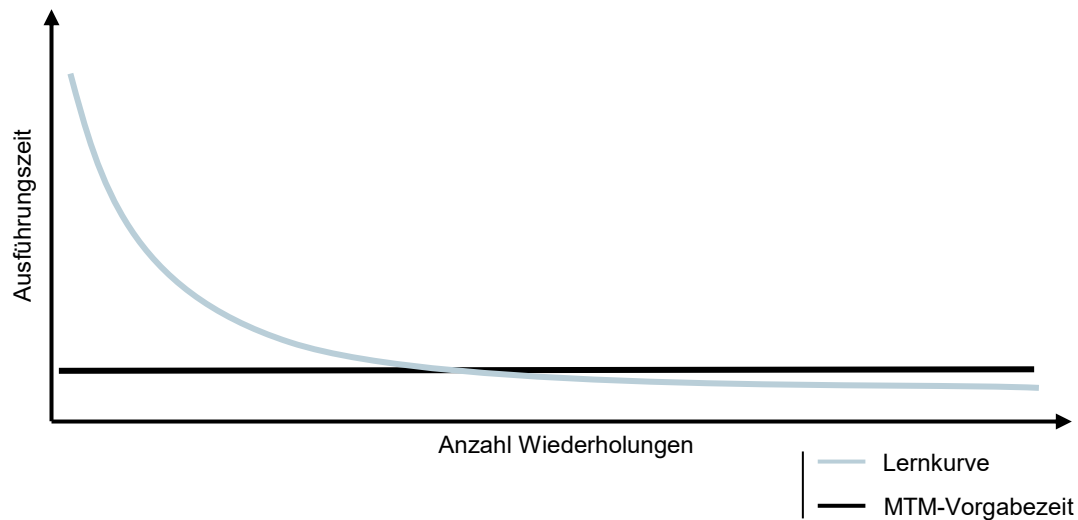


Abbildung 2-16: Lernkurve nach De Jong (eigene Darstellung in Anlehnung an DEJO60)

In der Montage sollte dieser Grenzwert etwas unter der Vorgabezeit liegen, die z. B. durch Systeme vorbestimmter Zeit definiert wird. Untersuchungen von JESKE bestätigen das Konzept der Lernkurve in Bezug auf die manuelle Montage. Es konnte gezeigt werden, dass die Änderungsrate – welche als Lerngeschwindigkeit interpretiert werden kann – nicht konstant ist. Stattdessen folgt sie einem exponentiellen Verlauf, bei dem sich der größte Lernfortschritt zu Beginn einstellt und mit zunehmender Übung abflacht [JESK13].

Im Vergleich zu den weitgehend unveränderlichen Dispositions- und Konstitutionsmerkmalen sind Qualifikationen und Kompetenzen durch Lernprozesse veränderbar. Während Qualifikationen die erlernten Fähigkeiten, Fertigkeiten und das (erlernte) Wissen einer Person beschreiben, die zur Ausführung von Arbeitsaufgaben erforderlich sind, geht der Begriff der Kompetenz darüber hinaus. Kompetenzen umfassen nicht nur die Qualifikation, sondern beziehen sich auch auf das situative Handeln nach eigenen Zielen und subjektiven Leistungsvoraussetzungen [SCHL18, S. 109]. Um die Begriffsvielfalt in diesem Zusammenhang klar zu definieren, wird im Folgenden eine Abgrenzung der Terminologien vorgenommen:

- Fähigkeiten bezeichnen das psychische und physische Vermögen einer Person, eine Handlung auszuführen [ERPE15, S. 3; DAND21, S. 48].
- Fertigkeiten beschreiben die durch Übung erworbene Geschicklichkeit oder Routine bei der Ausführung spezifischer Aufgaben, wie beispielsweise Schrauben oder Löten [ERPE15, S. 3; DAND21, S. 48].
- Wissen ist die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Personen zur Lösung von Problemen einsetzen [PROB12, S. 23] und basiert auf Daten und Informationen [ERPE15, S. 2].

Kompetenz ist nach NORTH kontextspezifisch, personengebunden (individuell), lernbar und evaluierbar [NORT21, S. 140]. Nach WEINERT schließt der Begriff Kompetenz darüber hinaus motivationale, willensbezogene und soziale Fähigkeiten ein, die es ermöglichen, erlernte Fertigkeiten verantwortungsvoll und erfolgreich auf andere Herausforderungen zu übertragen [WEIN02, S. 27–28].

Kompetenz ist wissensbasiert und entwickelt sich durch Lernen und Erfahrung. Dabei vollzieht sich die Kompetenzentwicklung in mehreren Stufen oder Phasen [SCHL18, S. 115]. Abbildung 2-17 zeigt schematisch, wie das Kompetenzniveau in der Montage durch die Anzahl der Wiederholungen einer Aufgabe gesteigert wird. Mit wachsender Kompetenz erweitert sich die Komfortzone des Werkers. Außerhalb dieser Zone können jedoch Über- oder Unterforderung auftreten, was zu Fehlern und Leistungseinbußen führt [CSIK90, S. 7].

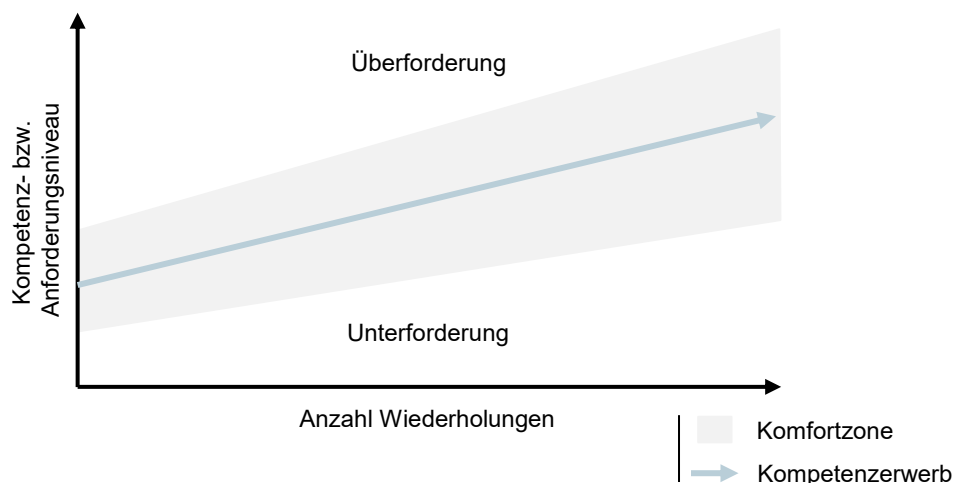


Abbildung 2-17: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Kompetenzniveau, Anzahl der Wiederholungen und der resultierenden Komfortzone (eigene Darstellung in Anlehnung an DAND21, S. 49)

Durch Wiederholung der Arbeitsaufgabe durchläuft der Werker einen Lernprozess, wodurch sich das empfundene Anforderungsniveau fortlaufend ändert. Abhängig von der individuellen Kompetenz des Werkers verlässt er dabei seine Komfortzone [DAND21, S. 48]. Während Qualifikationen häufig in Form von Zertifikaten erworben werden, fokussiert sich Kompetenz stärker auf die individuelle Fähigkeit zur

Problemlösung in spezifischen Kontexten [SCHL18, S. 115]. Dieses Verständnis von Kompetenz ist auch im Rahmen dieser Dissertation von zentraler Bedeutung, da es das individuelle Lernverhalten in den Vordergrund stellt.

Um den Kompetenzerwerb in der Montage optimal zu unterstützen, spielt die bereits beschriebene Menschzentrierung eine entscheidende Rolle. Montagesysteme respektive KAS können dabei entweder adaptiv oder adaptierbar gestaltet werden. Adaptive Systeme passen sich eigenständig an veränderte Umweltbedingungen (kontextadaptiv) oder individuelle Nutzereigenschaften (nutzeradaptiv) an. Bei adaptierbaren Systemen hingegen nimmt der Werker die Anpassungen selbst vor [OPPE94, S. 16; BENG17, S. 58]. Nutzeradaptive KAS zielen darauf ab, dem Werker entsprechend seiner Kompetenzen und seiner aktuellen Beanspruchung situationsgerechte Informationen zur Verfügung zu stellen, um Unsicherheiten und Überforderung zu vermeiden, ohne jedoch Unterforderung zu erzeugen [BORN18, S. 267].

Neue Möglichkeiten zur effizienten Erstellung von kompetenzgerechten Montageanweisungen für KAS eröffnen sich durch den Einsatz der zunehmend verbreiteten LLMs [MEYE24, S. 2], die im folgenden Kapitel eingeführt werden.

2.5 Large Language Models

Da LLMs in dieser Dissertation zur teilautomatisierten Erstellung von Montageanweisungen eingesetzt werden, ist ein grundlegendes Verständnis ihrer Funktionsweise und Anpassungsmöglichkeiten notwendig. Dieses Kapitel dient der technologischen Einordnung von LLMs und erläutert zentrale Konzepte ihrer Anwendung. Dabei wird insbesondere auf ihre Funktionsweise sowie auf spezifische Anpassungs- und Optimierungsmethoden eingegangen, um ihren praktischen Nutzen im Kontext der Montageanweisungserstellung darzulegen.

2.5.1 Grundlagen und Einordnung

LLMs, wie das Ende des Jahres 2022 von OpenAI veröffentlichte ChatGPT, haben die Wahrnehmung von KI grundlegend verändert. GPT steht für „Generative Pre-Trained Transformer“ und zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, in natürlicher Sprache zu interagieren, Texte zu generieren, zwischen Sprachen zu übersetzen und sogar Computercode zu schreiben. ChatGPT übertrifft frühere Systeme in Bezug auf Sprachflüssigkeit sowie Leistung und hat Anwendungen in vielen Bereichen revolutioniert [DOUG23, S. 2]. Abbildung 2-18 zeigt wie LLMs im Kontext der KI eingeordnet werden.

KI bezeichnet Systeme, die intelligentes Verhalten zeigen, indem sie ihre Umgebung analysieren und mit einem gewissen Grad an Autonomie Aktionen ausführen, um spezifische Ziele zu erreichen [SHEI23, S. 20]. Grundlage hierfür ist Machine Learning (ML) – ein Teilgebiet der KI, bei dem Modelle anhand von Beispieldaten trainiert werden, um Muster zu erkennen und Prognosen abzuleiten [LANQ23, S. 23].

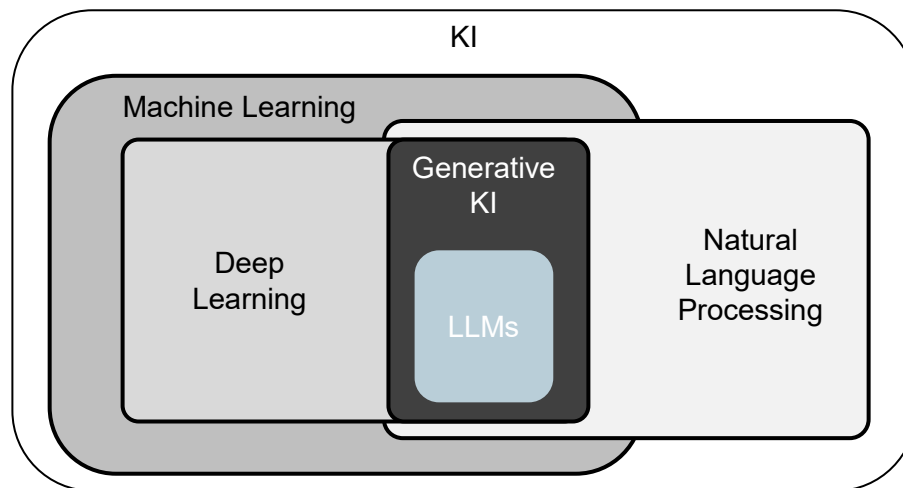


Abbildung 2-18: Einordnung generativer KI und LLMs im Kontext der KI (eigene Darstellung in Anlehnung an LANQ23, S. 21)

Ein besonders leistungsfähiger Bereich des ML ist Deep Learning (DL), bei dem mehrschichtige künstliche neuronale Netze eingesetzt werden, um komplexe Zusammenhänge in großen Datenmengen zu erkennen [LECU15, S. 436]. Auf dieser Basis entwickelte sich das Natural Language Processing (NLP), – die Fähigkeit von Computern, menschliche Sprache zu verstehen, zu interpretieren und selbst zu erzeugen [LANQ23, S. 18].

LLMs vereinen DL und NLP mit der sogenannten Transformer-Architektur, die seit 2017 den Stand der Technik in der Sprachverarbeitung darstellt. Charakteristisch für diese Architektur ist die Fähigkeit, kontextbezogene Bedeutungen in Texten zu erfassen und so auch längere Textpassagen kohärent zu verarbeiten. [VASW17] In Verbindung mit großen Trainingsdatensätzen und autoregressiver Textgenerierung bilden LLMs damit den Kern der generativen KI – also von Systemen, die nicht nur Sprache verstehen, sondern auch eigenständig neue Inhalte erzeugen können [BOMM21, S. 5].

Technisch gesehen übersetzen LLMs Eingabetoken – kleinste semantische Einheiten – in numerische Vektoren, die deren Bedeutung und Kontext abbilden. Mit Hilfe autoregressiver Verfahren generieren sie Token für Token neue Textelemente, was kohärente, stilistisch konsistente Ausgaben ermöglicht. [LANQ23, S. 154] LLMs werden auf umfangreichen Textdatensätzen trainiert, wodurch sie die Komplexität und Nuancen menschlicher Sprache erfassen. Mit hoher Genauigkeit und stilistischer Vielfalt können LLMs eine Vielzahl linguistischer Aufgaben bewältigen, von der Textklassifikation bis hin zur kohärenten Textgenerierung, was sie zu einer Schlüsseltechnologie für zahlreiche Anwendungen macht. [OZDE24, S. 3] Allerdings zeigen sich auch Einschränkungen. Da die Trainingsdaten überwiegend aus Texten von und für Erwachsene bestehen, haben LLMs z. B. Schwächen im Umgang mit kindlicher Sprache.

2.5.2 Prompt Engineering und Fine-Tuning

Um die Leistung von LLMs in spezifischen Anwendungsbereichen zu optimieren, werden zwei zentrale Techniken eingesetzt:

- Prompt Engineering zielt darauf ab, das LLM durch spezifische Eingabeaufforderungen zu präzisen Antworten zu lenken. Durch strategisch formulierte Eingaben kann das Modell dazu gebracht werden, kontextbezogene und besonders relevante Ergebnisse zu generieren. Eine gut durchdachte Eingabeaufforderung (Prompt) bietet den Vorteil, dass das Sprachmodell effizient arbeitet, indem es nur die relevantesten und präzisesten Antworten liefert. [OZDE24, S. 84]
- Fine-Tuning (deutsch: Feinabstimmung) ist ein Trainingsprozess, bei dem ein vortrainiertes LLM mit einem kleineren, aber für die spezifische Aufgabe optimierten Datensatz weiter trainiert wird [OZDE24, S. 18]. Dabei wird „Transfer Learning“ genutzt, eine Technik, die es ermöglicht, das im Pretraining erworbene Wissen – wie allgemeines Sprachverständnis, Grammatik und allgemeines Wissen – für neue, domänenspezifische Aufgaben oder Anwendungsbereiche zu nutzen [OZDE24, S. 111]. Durch die Anpassung der Modellparameter (auch Hyperparameter genannt) wird die Leistung für spezifische Anwendungen verbessert. Das Fine-Tuning kann die Genauigkeit und Relevanz eines LLM erheblich steigern, da es gezielt auf Anwendungsbereiche und Terminologien abgestimmt wird, um eine bessere Übereinstimmung mit den gewünschten Ausgaben zu erzielen. [OZDE24, S. 18]

Ziel des Fine-Tunings ist es, ein Modell zu entwickeln, das auch mit bisher unbekannten Daten zuverlässig arbeitet – eine Eigenschaft, die als Generalisierungsfähigkeit bezeichnet wird. Die Vorgehensweise des Fine-Tunings basiert auf einer etablierten Methode aus dem Bereich des ML. Die Methode gliedert sich, wie in Abbildung 2-19 dargestellt, in zwei wesentliche Schritte: (1) die Modellauswahl und (2) die Modellbewertung. [HAST09, S. 222]

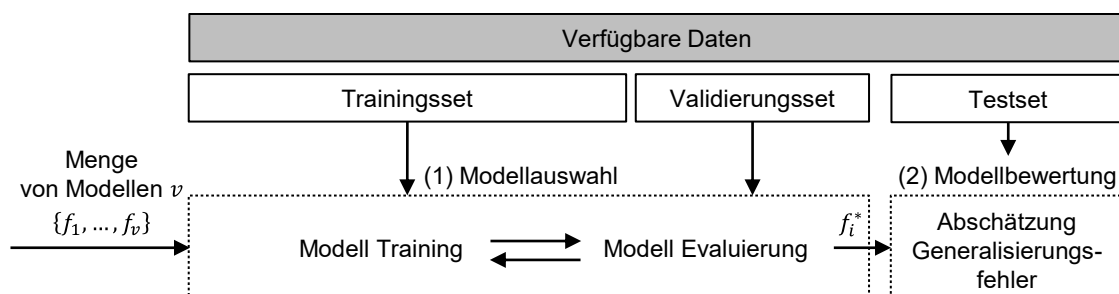


Abbildung 2-19: Aufteilung der Datensätze und Vorgehensweise Fine-Tuning (eigene Darstellung in Anlehnung an BIEG23, S. 10)

Modellauswahl: Im Rahmen der Modellauswahl werden verschiedene Modelle mit dem Trainingsset trainiert. Ein Teil der Trainingsdaten, das sogenannte Validierungsset,

wird dabei verwendet, um die Hyperparameter der Modelle zu optimieren und das beste Modell aus einer Menge potenziell geeigneter Modelle zu identifizieren [HAST09, S. 222]. Hierbei gibt es keine allgemeingültige Regel zur Festlegung des Verhältnisses zwischen Trainings-, Validierungs- und Testsets, da dies von verschiedenen Faktoren wie der verfügbaren Datenmenge und der spezifischen Aufgabe abhängt [HAST09, S. 222].

Modellbewertung: Im zweiten Schritt wird das beste Modell anhand eines separaten Testdatensatzes bewertet, um die Generalisierungsfähigkeit zu messen. Dabei wird der Testdatensatz ausschließlich zur Bewertung und nicht zur Modellauswahl verwendet, um eine verzerrte Leistungsbewertung auszuschließen [MURP12, S. 23].

Die Aufteilung in die verschiedenen Sets ist essenziell, um Overfitting und Underfitting zu vermeiden und eine ausgewogene Balance zwischen Modellkomplexität und Generalisierungsfähigkeit sicherzustellen. Overfitting tritt auf, wenn ein Modell eine zu hohe Komplexität besitzt und spezifische, aber irrelevante Muster in den Trainingsdaten lernt, die nicht Teil allgemeiner Zusammenhänge sind. Dies führt dazu, dass das Modell zwar mit den Trainingsdaten sehr gut abschneidet, aber mit neuen, unbekannten Daten schlechte Ergebnisse liefert. [ZHAN23, S. 142] Im Gegensatz dazu tritt Underfitting auf, wenn die Modellkomplexität zu gering ist, sodass grundlegende Muster und Zusammenhänge in den Daten nicht erkannt werden können, was sowohl auf den Trainings- als auch auf den Testdaten zu einer schlechten Leistung führt [ZHAN23, S. 146].

2.6 Zusammenfassung und Fazit

Kapitel 2 führt in die theoretischen Grundlagen ein, die für das Verständnis der manuellen Montage und den Einsatz Kognitiver Assistenzsysteme im Hinblick auf die Beantwortung der in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen wesentlich sind. Zunächst werden zentrale Begriffe wie Montage, Produkt, Prozess und Betriebsmittel definiert und deren wechselseitige Abhängigkeiten sowie die damit verbundene Terminologie erläutert. Es wird verdeutlicht, dass die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Montagesystemen insbesondere im Hinblick auf die steigende Komplexität und Variantenvielfalt moderner Produkte von entscheidender Bedeutung sind.

Des Weiteren werden KAS als IT-gestützte Systeme beschrieben, die Werker durch gezielte Informationsbereitstellung bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Sie erfassen und verarbeiten Daten, um relevante Informationen bedarfsgerecht bereitzustellen, wodurch Montagefehler reduziert, der Anlernprozess verkürzt und die Produktivität gesteigert werden.

Darüber hinaus wird die Rolle des Menschen als zentraler Akteur in der Montage hervorgehoben, der aufgrund seiner kognitiven und motorischen Fähigkeiten im Hinblick auf die steigende Variantenvielfalt automatisierten Systemen überlegen ist. In diesem Zusammenhang werden unterschiedliche Arten der Informationsverarbeitung und die

Bedeutung von Lernprozessen und Kompetenzentwicklung in der Montage erläutert. Entscheidend dabei ist die menschenzentrierte Gestaltung des Montagesystems, insbesondere durch den Einsatz von nutzeradaptiven KAS, die eine personenindividuelle Unterstützung der Werker bei ihrer Entscheidungsfindung und Handlungsausführung ermöglichen.

Fortschritte in der KI, insbesondere im Bereich der LLMs, ermöglichen die automatisierte Generierung textbasierter Montageanweisungen sowie deren Anpassung an spezifische Nutzerbedarfe. Techniken wie Prompt Engineering und Fine-Tuning bieten dabei effektive Methoden zur domänenspezifischen Optimierung der Modelle.

3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden relevante Forschungsansätze und Publikationen im Hinblick auf den Forschungskontext der Dissertation vorgestellt. Dazu wurden zwei systematische Literaturrecherchen einschließlich Rückwärts- und Vorwärtsrecherche nach WATSON ET AL. durchgeführt, um einen ganzheitlichen Überblick über die jüngsten Entwicklungen in den jeweiligen Forschungsgebieten zu erhalten [WATS20]. Die identifizierten Ansätze werden in drei Themenfelder eingeteilt, die sich aus der Zielsetzung der Dissertation ergeben. In Kapitel 3.1 werden Ansätze präsentiert, die sich auf die Nutzeradaptivität Kognitiver Assistenzsysteme beziehen (Themenfeld I). Kapitel 3.2 beschäftigt sich mit Ansätzen zur Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen (Themenfeld II). In Kapitel 3.3 werden Ansätze vorgestellt, die sich nicht eindeutig Themenfeld I oder II zuordnen lassen, aber einen allgemeinen Bezug zum Forschungskontext aufweisen oder in beiden Themenfeldern einen Beitrag leisten (Themenfeld III). In Kapitel 3.4 wird die Forschungslücke und darauf basierend der Handlungsbedarf der Dissertation abgeleitet. Die relevanten Ansätze werden chronologisch nach ihrem Erscheinungsjahr vorgestellt. Sofern in der jeweiligen Publikation ein zugehöriges Forschungsprojekt genannt wird, wird dieses ebenfalls aufgeführt.

3.1 Nutzeradaptive Kognitive Assistenzsysteme

In diesem Abschnitt werden die identifizierten Ansätze in Bezug auf nutzeradaptive KAS vorgestellt. Details zur entsprechenden systematischen Literaturrecherche sind im Anhang B in Tabelle B-1 zu finden.

Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion | ACIPE – Adaptive Cognitive Interaction in Production Environments

BANNAT entwickelt im Rahmen seiner Dissertation und des Forschungsprojekts **ACIPE** ein Assistenzsystem für die manuelle Montage. Dieses basiert auf Montageablaufplänen, der Erfassung der Werkertätigkeit und der Visualisierung von „Assistenzinformationen“. Die „Assistenzinformationen“ umfassen die benötigten Bauteile und eine Beschreibung der auszuführenden Montageoperation, die für jeden Arbeitsschritt bereitgestellt wird. Die Montageaufgaben werden in Teil- und Unteraufgaben strukturiert und in einer logischen Reihenfolge im Montageablaufplan dargestellt. Jeder Schritt enthält eine Textanweisung und ein Bild sowie zusätzliche Informationen für den Werker. Das „Montageablaufplan Graphical User Interface“ (GUI) fungiert als Schnittstelle zum Werker und erlaubt die Konfiguration des Detaillierungsgrades der „Assistenzinformationen“, wobei Konstellationen aus Bildern und Textanweisungen möglich sind. Detailliertere Informationen können durch den Werker selbst in dem GUI für jede Montageaufgabe aufgerufen werden. Der Detaillierungsgrad der hinterlegten Informationen kann individuell und produktspezifisch angepasst werden. [BANN14]

Stop helping me – I'm bored! Why assembly assistance needs to be adaptive

Der Ansatz von FUNK ET AL. basiert auf drei Zuständen, die durch das Assistenzsystem erkannt werden. (1) Ob der Werker das Bauteil aus der richtigen Box entnimmt, (2) ob das Bauteil korrekt verbaut wurde oder es sich noch in einem Zwischenzustand befindet und (3) ob ein Werkzeug von seinem definierten Platz genommen wurde. Der gesamte Ansatz wird prototypisch an einem realitätsnahen Montagearbeitsplatz umgesetzt und in einem Demonstrator veranschaulicht, ohne dass ein konkretes Montageobjekt näher spezifiziert wird. Dieser sieht drei Modi für Montageanweisungen vor: den Anfängermodus, der für jeden Schritt Videoanleitungen bereitstellt, den Fortgeschrittenenmodus, der lediglich die Position der Entnahme und die Kontur der Montagepositionen visuell hervorhebt, und den Expertenmodus, der keine Montageanweisungen anzeigt. Während der Ausführung der Montageaufgaben zählt das System die korrekt ausgeführten Montageoperationen sowie die aufgetretenen Fehler (Montagefehler und Entnahmefehler) und berechnet jeweils das Verhältnis zwischen richtigen Operationen und Fehlern. Fällt das Verhältnis unter einen Schwellwert von 0,1, schaltet das System in den Fortgeschrittenenmodus. Fällt das Verhältnis unter einen Schwellwert von 0,01, schaltet das System in den Expertenmodus. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Werker, wenn er keine Fehler macht, den Arbeitsablauf gelernt hat und keine Montageanweisung mehr benötigt. Die Schwellwerte wurden empirisch ermittelt. [FUNK15a]

Entwicklung eines interaktiv, adaptiven Montageassistenzsystems

KOELZ ET AL. präsentieren ein Konzept zur automatischen Anpassung von Montageanweisungen an das individuelle „Leistungsniveau“ des Werkers. Hierbei wird zwischen vier Stufen – Anfänger, Geübter, Profi und Experte – unterschieden. Das Adaptivitätskonzept unterstützt den Werker im „Anfänger-Modus“ durch In-situ-projizierte Videos, Symbole, Textanweisungen und farbliche Positionskennzeichnungen bei der Entnahme- und der Fügeoperation. Nach fünf Montagedurchgängen wird der gleitende Mittelwert der letzten fünf durchgeführten Durchgänge ermittelt. Wenn dieser Wert unter dem 1,5-fachen der zugrundeliegenden MTM-Vorgabezeit liegt, steigt der Werker in die Stufe „Geübter“ auf. Der Montageanweisungsumfang wird von der Anleitung mit Videos und Animationen auf die Darstellung mit Hilfe von Bildern reduziert. Im „Profi-Modus“ (Durchführungszeit < 1,2-fache MTM-Vorgabezeit) erfolgt die Anleitung durch die Verwendung von Symbolen, Textanweisungen und farblichen Positionskennzeichnungen. Im „Experten-Modus“ (Durchführungszeit < 1,1-fache MTM-Vorgabezeit) wird nur die Entnahmeoperation durch entsprechende Symbole unterstützt. Die Montageoperation selbst erfolgt hierbei ohne Anweisung. Bei fehlerhafter Prozessausführung stuft das System das aktuelle „Leistungsniveau“ des Werkers niedriger ein und unterstützt erneut mit einer entsprechend umfangreicheren Montageanweisung. Um die Verweildauer auf mittleren Leistungsniveaus zu verhindern und den Werker zu fördern, wertet das System die letzten 20 Montagedurchgänge aus. Liegen 90% dieser

Durchgänge (18 von 20) innerhalb einer festgelegten Schwankungsbreite, reduziert das System automatisch den Umfang der Montageanweisungen und stuft den Werker auf ein höheres „Leistungsniveau“ hoch. [KOEL15b; KOEL15a]

Dynamic operator instructions based on augmented reality and rule-based expert systems | You2 – Young Operator 2020

SYBERFELDT ET AL. stellen im Rahmen des Forschungsprojekts **You2** das Augmented Reality Expert System (ARES) vor, das aus einem regelbasierten Expertensystem und einem AR-System besteht. Das Expertensystem bestimmt, welche Informationen zu welchem Zeitpunkt in der AR-Brille zu sehen sind. Die Art der Informationsbereitstellung bzw. der Umfang der Montageanweisung hängt von der Dauer der Aufgabenausführung und der Kompetenz des Werkers ab, wobei zwischen „Anfängern“ und „erfahrenen“ Werkern unterschieden wird. Das Expertensystem passt die Montageanweisungen auf Basis von nicht näher beschriebenen Regeln in Abhängigkeit der Ausführungsdauer und der Kompetenz des Werkers an. Dabei sind verschiedene Konstellationen vorgesehen, darunter einfache Textanweisungen, detaillierte Textanweisungen, detaillierte Textanweisungen mit Hinweispfeilen, Textanweisungen mit grafischen Hervorhebungen und rein grafische Hervorhebungen. [SYBE16]

Approach for the Development of an Adaptive Worker Assistance System Based on an Individual Profile Data Model

GALASKE ET AL. entwickeln Datenmodelle, die die Beschreibung eines Kompetenzprofils sowie eine Beschreibung der ergonomischen Eigenschaften von Werkern ermöglichen. Das Kompetenzprofil umfasst einen sogenannten „privilege Level“, der mehrere gewichtete Parameter berücksichtigt, wie z. B. die bisherige Montage der Produktvariante, den bisherigen Einsatz an der Montagestation, die Montagegeschwindigkeit, die Fehleranzahl und die Fehlerart. Der „privilege Level“ definiert, in welchem Maße der Werker berechtigt ist, den Detaillierungsgrad der Montageanweisung zu reduzieren oder Montageanweisungen zu überspringen. Es gibt vier „Berechtigungslevel“. Im ersten Level ist das Überspringen von Montageanweisungen nicht erlaubt. Im zweiten Level kann der Detaillierungsgrad der Montageanweisung reduziert werden. Im dritten Level dürfen einzelne Montageanweisungen übersprungen werden und im vierten Level kann der Werker frei entscheiden, ob und welche Informationen er erhalten möchte. [GALA16]

Generic Model for Managing Context-Aware Assembly Instructions

CLAEYS ET AL. entwickeln eine Ontologie zur Modellierung des Kontextes von Montageaufgaben. Diese dient als Grundlage für kontextabhängige Montageanweisungen und besteht aus vier primären Domänen (Aufgaben, Mitarbeiter, Orte, Material) sowie vier zusätzlichen Domänen (Erfahrungen, Bedingungen, Nutzung, Anforderungen), die die Relationen zwischen den primären Domänen beschreiben. Durch die Berücksichtigung von Parametern wie Leistungstyp und Erfahrung des Werkers wird ein

personalisiertes, kontextbewusstes Informationsangebot realisiert, das sich dynamisch an den individuellen Lernfortschritt und die Effizienz des Montagepersonals anpasst. In einer mehrstufigen Adaptionstrategie werden zunächst sämtliche Anweisungen zur Erfassung umfangreicher Kontextdaten bereitgestellt. Anschließend erfolgt eine schrittweise Personalisierung der Montageunterstützung durch statische und dynamische Filter, basierend auf den erfassten Daten und der direkten Rückmeldung des Werkers. Die Interaktion des Werkers mit dem System durch Bewertungsfunktionen fließt direkt in die Anpassung der Assistenz ein und fördert so die kognitive Integration sowie die Akzeptanz des Systems im Montageprozess. [CLAE16; CLAE18]

motionEAP - System zur Effizienzsteigerung und Assistenz bei Produktionsprozessen in Unternehmen auf Basis von Bewegungserkennung und Projektion

BAECHLER ET AL. entwickeln im Rahmen des Forschungsprojekts **motionEAP** ein In-situ-projektionsbasiertes System. Die Umsetzung erfolgte prototypisch an realen Montagearbeitsplätzen, etwa an Einzelarbeitsplätzen zur Montage von Schraubzwingen und in verketteten Zellen zur Montage von PKW-Anlassern. Dieses System differenziert zwischen Entnahme- und Montageoperationen und visualisiert die Entnahme durch Projektion eines grün blinkenden Lichtbalkens und der Entnahmestückzahl auf der entsprechenden Bereitstellungsbox. Ein roter Balken signalisiert, wenn ein Worker versucht, ein Teil aus der falschen Box zu entnehmen, und fungiert als Fehlerrückmeldung. Nach der korrekten Entnahme wird die Montageposition und die Bauteilorientierung durch eine grün leuchtende Kontur des Bauteils an der entsprechenden Position auf der Montagevorrichtung angezeigt. Das KAS ist durch die Erfassung von Montageabläufen, Zeiten und Fehlern in der Lage, den Erfahrungsstand des Mitarbeiters einzuschätzen. Dies ermöglicht individuelle Montageanweisungen mit geringerem oder höherem Informationsgehalt bzw. mit mehr oder weniger visuellem Feedback in drei „Feedback-Leveln“: „Anfänger“ erhalten Entnahme- und Montagepositionen sowie eine Videoanleitung, „Fortgeschrittene“ sehen projizierte Konturen. „Experten“ erhalten keine visuellen Anweisungen, sondern das System überwacht den Prozess und kann bei Fehlern eingreifen. Das System passt die Informationen je nach Erfahrung und Bedarf automatisch an. [BAEC18]

Adaptive Assistenz in der Produktion - Eine Methodik zur individuellen Mitarbeiterbefähigung | APPsist

BREITKOPF stellt in seiner Dissertation und im Rahmen des Forschungsprojekts **APPsist** eine Methodik zur individuellen Mitarbeiterbefähigung in der Produktion vor. Sie basiert auf dem Abgleich von individuellen Kompetenzprofilen und Assistenzprozessen, die eine adaptive Assistenz ermöglichen sollen. Dazu werden die Worker mit Hilfe eines Kompetenzmodells, das aus DIN 8593 abgeleitete „Fertigkeiten“ (Prozesse wie Zusammensetzen, Bohren etc.) enthält, die für die Ausführung von Tätigkeiten auf dem Shopfloor erforderlich sind, auf einer „Kompetenzniveauskala“ in die Stufen „Anfänger“, „Basis“, „Fortgeschritten“ und „Experte“ eingeteilt. Ein Algorithmus gleicht die

Leistungsanforderungen eines Prozesses mit dem Kompetenzprofil ab und empfiehlt eine angemessene Detaillierungsstufe für die „Prozessbeschreibung“. Hierbei werden sowohl die Anforderungen des Prozesses als auch die Fähigkeiten des Werkers berücksichtigt. Abhängig von der Konstellation der Leistungsanforderung, der individuellen Fähigkeiten und der Risikoprioritätszahl des Prozesses – einem Maß zur Bewertung potenzieller Fehler basierend auf deren Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckbarkeit – wird eine Anzahl von Mindestausführungen der Montageoperation zur Erreichung einer Stufe mit weniger detaillierten Beschreibungen vorgeschlagen. Durch die schrittweise Reduzierung der benötigten Informationen soll der Werker in die Lage versetzt werden, die Aufgaben eigenständig auszuführen. Die finale Entscheidung, welche Detaillierungsstufe der „Prozessbeschreibung“ gewählt wird, obliegt dem Werker selbst. Die Beschreibung der Prozesse erfolgt manuell durch ein Expertenteam mit Hilfe der Modellierungssprache Business Process Model and Notation (BPMN). Hierbei werden Prozesse teilweise in Subprozesse aufgespaltet, was eine kleinschrittigere Adaptivität in mehreren Abstufungen ermöglicht. Als Teil der individuellen Kompetenzprofile werden zusätzlich Lern- und Vergessensprozesse dynamisch integriert, um durch die Wiederholung von Arbeitsaufgaben die Mitarbeiterunterstützung zu verbessern. Eine erfolgreich ausgeführte Tätigkeit impliziert einen Lernprozess, eine nicht erfolgreich ausgeführte Tätigkeit impliziert Vergessen. [BRE18]

A Cognitive Assistance Framework for Supporting Human Workers in Industrial Tasks

HASLGRUEBLER ET AL. schlagen ein Framework für die Implementierung eines KAS vor, das eine menschenzentrierte adaptive Unterstützung von Montageaufgaben ermöglichen soll. Das Framework umfasst vier kognitive Funktionen: Perzeption, Kontextmodellierung (einschließlich Fortschrittsmodellierung im Arbeitsablauf und Modellierung des kognitiven Zustands des Systembedieners), Schlussfolgerung und Entscheidungsfindung sowie die autonome Ausführung von Assistenzmaßnahmen. Die Perzeption wird durch am Körper getragene Sensoren (Eyetracker, Motion Tracker und physiologische Sensoren) und ortsfeste Sensoren in der Arbeitsumgebung (RGB-D, RGB-Kameras) abgedeckt, um die Modellierung von Aktivität und Kontext zu ermöglichen. Die Bestimmung des „Skill Level“ des Werkers auf Ebene der Montageoperation kann z. B. durch den Einsatz von Eye-Trackern erfolgen, um zu überprüfen, ob das richtige Fügeteil aus der Bereitstellung ausgewählt wird und um zu analysieren, wie der Blickverlauf währenddessen strukturiert ist. Alternativ kann die kognitive Beanspruchung gemessen werden, um daraus Rückschlüsse auf die Fähigkeiten zu ziehen bzw. diese indirekt zu klassifizieren, beispielsweise durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Haut (elektrodermale Aktivität), um den Stresspegel bei der Ausführung einer Montageoperation festzustellen. Auf diese Weise soll eine nutzeradaptive Unterstützung durch das KAS nur bei Bedarf und auf der Grundlage der Präferenzen, Einschränkungen und Fähigkeiten des Nutzers erfolgen. [HASL18]

Soziotechnisches Lernsystem am Arbeitsplatz - Förderung der Kompetenz von Mitarbeitern durch soziotechnische Assistenzsysteme zum flexiblen Einsatz am Arbeitsplatz

ADLER ET AL. und DANDER ET AL. stellen ein Konzept zur dynamischen Bereitstellung von Informationen am Arbeitsplatz vor. Das Ziel besteht darin, Werker, die individuelle Anforderungsniveaus bei der Ausführung der gleichen Montageoperation verspüren, so zu unterstützen, dass weder Unter- noch Überforderung auftreten. Dazu werden personenindividuelle Lernkurven genutzt, welche auf Basis der Erstausführungszeit und der festgelegten Vorgabezeit individuelle Prognosen über die Ausführungszeiten ermöglichen. Abweichungen der Ausführungszeiten sowie Fehler deuten auf Unter- oder Überforderung hin. Darüber hinaus wird die aktuelle Ausführungszeit einer manuellen Montageoperation erfasst und die Varianz der letzten Ausführungszeit unter Berücksichtigung der letzten zehn Ausführungen dynamisch zur Steuerung des Informationsgehalts genutzt. Mit diesem Ansatz soll die individuelle Leistungsfähigkeit des Werkers berücksichtigt und gefördert werden. Es werden drei Informationsstufen – „hoch“, „mittel“ und „gering“ – eingeführt. Zur Deckung des hohen Informationsbedarfs, insbesondere bei den ersten Ausführungen einer Montageoperation, werden Animationen oder Videos eingesetzt. Mittlerer Informationsbedarf, beispielsweise nach mehrmaliger Wiederholung in Kombination mit längeren Pausen, wird durch Explosionszeichnungen, Animationen sowie bildbasierte Informationen abgedeckt. Geringe Informationsbedarfe werden durch Textanweisungen oder Bildmaterialien des finalen Produktzustands bereitgestellt. [ADLE19; DAND21]

Functionalities and Implementation of Future Informational Assistance Systems for Manual Assembly

PETZOLDT ET AL. entwickeln ein menschenzentriertes Assistenzsystem, das insbesondere die ergonomischen Bedürfnisse und die Qualifikation der Werker berücksichtigt. Das System ermöglicht eine individualisierte Anpassung der Montageanweisungen, indem es unterschiedliche Detailgrade der Anweisungen anbietet. Dies beinhaltet sowohl die Granularität der Montageoperation als auch den Umfang ergänzender Informationen. Die Auswahl des Detailgrades kann entweder automatisch durch das System, durch den Schichtleiter oder durch den Werker selbst erfolgen. Das System berechnet einen „Qualification Score“, der auf drei Dimensionen basiert: (1) der Fehler rate bei Entnahme- und Fügeoperationen, (2) den Prozesszeiten sowie (3) ergonomischen Parametern, wie der Neigung des Oberkörpers und der Unterarme. Diese Daten werden mithilfe von drei Tiefenbildkameras aufgenommen, die die Erfassung der Arbeitsausführung ermöglichen. Zur Steigerung der Mitarbeitermotivation wird der Einsatz von Gamification-Elementen vorgeschlagen. Jeder Werker erhält einen personalisierten Avatar, der durch ein Punktesystem verschiedene Level erreichen kann. [PETZ20b]

Model-based approach for adaptive assembly assistance

SEHR ET AL. stellen einen Ansatz vor, der Lernkurven und Normalverhaltensmodelle nutzt, um eine nutzeradaptive Informationsbereitstellung durch ein KAS in drei aufeinanderfolgenden Phasen abzuleiten. In der Lernphase wird zunächst das zu erwartende individuelle Leistungsniveau nach dem Lernprozess ermittelt. Aus der Änderungsrate der Lernkurve und einem Leistungsschwankungswert in Form einer maximal zulässigen Anzahl von Montagefehlern wird der Schwellwert zum Erreichen der nächsten Phase berechnet. Nachdem der Lernprozess des Werkers abgeschlossen ist und der Werker ein stabiles Leistungsniveau erreicht hat, beginnt die Phase der Erstellung eines Normalverhaltensmodells – eines individuellen Referenzmodells, das das typische zeitliche und ablauforientierte Verhalten bei korrekt durchgeführten Montageoperationen unter normalen Bedingungen beschreibt. Das erstellte Modell wird in der Überwachungsphase verwendet, um signifikante Zeitabweichungen bei der Ausführung der Montageoperation zu erkennen. Diese sind ein Hinweis darauf, dass der Werker umfassendere Montageanweisungen benötigt. Mit Hilfe des Modells kann die konkrete Montageoperation identifiziert werden, in der die Zeitabweichung auftritt. Auf dieser Grundlage ändert das Assistenzsystem den Umfang der Montageanweisungen für diesen spezifischen Schritt. Die maximale Änderungsrate der Lernkurve und der maximal zulässige Fehlerwert werden nicht angegeben, sondern müssen für jeden Anwendungsfall selbst festgelegt werden. [SEHR21]

Zwischenfazit:

Die Literaturrecherche zu nutzeradaptiven KAS verdeutlicht, wie in Tabelle 3-1 dargestellt, dass die Autoren verschiedene Herangehensweisen zur Gestaltung der Assistenzsysteme verfolgen. Die Kernaspekte der unterschiedlichen Ansätze lassen sich in den folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Adaptionstufen: Es existiert eine Vielzahl an Benennungen der Adaptionstufen. Einige Ansätze nutzen ein „Feedbacklevel“, andere definieren „spezifische Leistungsniveaus“ oder „Kompetenzniveaus“. Die Anzahl der Adaptionstufen variiert, was eine personenindividuelle Anpassung der Montageanweisungstiefe an die Kompetenzstufe und die Bedürfnisse des Werkers ermöglicht. Die Konkretisierung von Schwellwerten wird nicht durchgehend verfolgt, bietet jedoch bei einigen Ansätzen eine objektive Basis zur Kompetenzbewertung.
2. Einstufungsindikatoren: Die Berücksichtigung von Fehlerraten und Prozesszeiten zeigt sich als konstante Determinante zur Bestimmung der individuellen Kompetenzstufe, welche die Systeme zur dynamischen Anpassung der Informationstiefe nutzen.
3. Umsetzung/Technologie: Die Umsetzung reicht von konzeptionellen Überlegungen bis hin zu praktisch implementierten Systemen, wobei vor allem In-situ Projektionstechniken eingesetzt werden.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung und Vergleich identifizierter Ansätze im Themenfeld I: nutzeradaptive Kognitive Assistenzsysteme

Autor	Adaptionsstufen			Einstufungsindikatoren		Umsetzung/Technologie
	Bezeichnung	Anzahl	Schwellwert	Fehler	Zeit	
BANN14	k. A.	k. A.	k. A.	Ja	Ja	Bildschirm und In-situ-Projektion
FUNK15	Feedbacklevel	3	Ja	Ja	Nein	In-situ-Projektion
KOEL15a KOEL15b	Leistungsniveaus	4	Ja	Ja	Ja	In-situ-Projektion
SYBE15	Competence Level	2	k. A.	Nein	Ja	AR-Brille
GALA16	Privilege Level	4	k. A.	Ja	Ja	Konzept
CLAE16 CLAE18	Skill Level	k. A.	k. A.	Ja	Ja	Konzept
BAEC18	Feedbacklevel	3	k. A.	Ja	Ja	In-situ-Projektion
BREI18	Kompetenzniveaus	4	k. A.	Ja	Ja	Bildschirm
HASL18	Skill Level	k.A.	k.A	Ja	Ja	Konzept
ADLE19 DAND21	Stufen	3	k. A.	Ja	Ja	Konzept
PETZ20	Qualification Level	k.A.	k. A.	Ja	Ja	Bildschirm und In-situ-Projektion
SEHR21	User Groups	2	k. A.	Ja	Ja	In-situ-Projektion

3.2 Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen

In diesem Kapitel werden die identifizierten Ansätze zur Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen vorgestellt. Details zur entsprechenden systematischen Literaturrecherche finden sich im Anhang B in Tabelle B-2.

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion

LANG beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation mit der ergonomischen Gestaltung von „Arbeitsanweisungen“. Dabei orientiert er sich an den Konventionen der internen technischen Dokumentation und entwickelt eine Gestaltungsrichtlinie für die textliche und bildliche Gestaltung von Montageanweisungen. Auf dieser Basis wird ein Softwareprototyp zur automatischen Generierung industrieller Arbeitsanweisungen (AGeniA) entwickelt. AGeniA ermöglicht die manuelle Erstellung eines Vorranggraphen aus einer grafisch aufbereiteten Modellierung der Produktstruktur im Vorranggraphen-Editor mittels Drag-and-Drop-Funktionen. In diesem Graphen können Anweisungsdaten als Extensible Markup Language (XML)-Container abgelegt werden, um prozessrelevante Informationen zu erfassen. Die Generierung von Montageanweisungen erfolgt durch die Kombination von vorselektierten Textbausteinen. Die Schablonengestaltung für die automatische Textgenerierung erfolgt flexibel über eine Template-Methode. Grundlegende Prozesse und Abläufe werden in Schablonen hinterlegt und über Variablen dynamisch an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst. Diese Flexibilität ermöglicht eine kontinuierliche Erweiterung der Datenbasis des Systems im laufenden Betrieb, wodurch eine zunehmende Unterstützung und Genauigkeit bei der Anweisungserstellung gewährleistet wird. Insgesamt führt diese Vorgehensweise zu einer teilautomatisierten Generierung von Montageanweisungen. [LANG07]

Creating Instructional Content für Augmented Reality based on Controlled Natural Language Concepts

MADER ET AL. präsentieren einen Ansatz zur Erstellung von Montageanweisungen durch Anwendung von Controlled Natural Language (CNL) – einer eingeschränkten Teilmenge natürlicher Sprache mit einem begrenzten Vokabular und klar definierten Regeln, die Ambiguität vermeiden und maschinelle Verarbeitbarkeit ermöglichen. Der Fokus des Ansatzes liegt auf der semantischen Modellierung von Montageanweisungen, die sowohl für den Menschen verständlich als auch für technische Systeme interpretierbar sein sollen. Durch den Einsatz von CNL werden die Montageanweisungen auf ein eindeutiges Vokabular beschränkt, was die Mehrdeutigkeit konventioneller Anweisungen verringert und die Konsistenz der Anleitung fördert. Zentral ist hierbei die Nutzung des XML-Formats zur Strukturierung der Daten, die eine klare Trennung zwischen inhaltlicher Bedeutung und ihrer Visualisierung erlaubt. Dies erleichtert die automatisierte Umwandlung in visuelle AR-Inhalte und bietet eine Basis für die strukturierte Generierung von Montageanweisungen. [MADE10]

Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung

WIESBECK entwickelt eine Graphenstruktur zur Darstellung möglicher und sinnvoller Produktzustände sowie der erforderlichen Montageoperationen. Zudem wird ein „Online-Algorithmus“ eingeführt, um situativ optimale Montagesequenzen unter

Berücksichtigung des Komplexitätsmaßes und des Kontexts bezüglich der verfügbaren Ressourcen zu ermitteln. Dieser ermöglicht eine teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen mithilfe eines vierstufigen Verfahrens unter Einbeziehung des Montageplaners. Der erste Schritt umfasst den Import der Vorrangbeziehungen und die Generierung einer XML-Struktur. Anschließend erfolgt als zweiter Schritt die Dekomposition der Montageoperationen in „Montageprimitive“ mittels einer Transformation (unter Verwendung einer Extensible Stylesheet Language (XSL)-Datei) in die operative XML-Struktur des Graphen. Die Unterscheidung zwischen Basis- und Aktionsbaugruppen/-teilen ermöglicht die Ableitung syntaktisch korrekter Anweisungsinformationen. Die Fügeverbindung wird hierbei durch drei Aspekte charakterisiert:

- Montageoperation: Informationen zur durchzuführenden Montageoperation und zur dabei angewendeten Verbindungstechnologie (z. B. Schraubverbindung) in Anlehnung an die DIN-Norm 8593-1
- Geometrie: Geometrieinformationen der Verbindung im Sinne von Positionierung und Orientierung der zu fügenden Baugruppen/-teile zueinander nach VDI-Richtlinie 2860 und bedarfsorientierte Angaben zu den Hilfsmitteln (z. B. Lage einer Kleberaupe)
- Prozess: Erweiterte Prozessinformationen der herzustellenden Verbindung (z. B. Drehmoment einer Schraubverbindung)

„Montageprimitive“ bezeichnen dabei elementare Bewegungs- und Prozesselemente des Teilarbeitsvorgangs. Ein „Montageprimitiv“ oder die Zusammenfassung mehrerer Montageprimitive bestimmt eine „Montagefunktion“.

Im dritten Schritt erfolgt die Ablage in oder der Abruf aus dem Wissensspeicher, welcher Stamm- und Produktdaten enthält. Abschließend erfolgt die Visualisierung und Validierung der Graphenstruktur durch den Montageplaner, bevor die Montageanweisungen an das Ausgabemedium übertragen und an den Werker ausgegeben werden. [WIES14]

Informationsassistent zur kognitiven Automatisierung manueller Montagearbeitsplätze | Plant@Hand

AEHNELT stellt in seiner Dissertation und im Rahmen des Forschungsprojekts **Plant@Hand** ein „Informationsassistentensystem“ für kognitive Arbeitsprozesse vor, die das Verstehen, Entscheiden und Planen einer Arbeitsaufgabe umfassen und auf den kognitiven Prozessen Denken, Lernen, Speichern und Erinnern basieren. Mithilfe eines digitalen Abbilds der Montagesituation, eines digitalen mentalen Modells des Werkers und einer digitalen Handlungssteuerung werden Informationen für Montageoperationen generiert und dem Werker bedarfsgerecht angezeigt. Das digitale mentale Modell bildet dabei das arbeitsplatzbezogene Handlungswissen des Werkers technisch ab. Es beschreibt typische Arbeitsabfolgen, situationsbezogene Entscheidungsregeln und relevante Kontextinformationen in strukturierter, maschinenlesbarer Form.

Für die digitalen Abbilder wird eine spezielle „Montagesemantik“ eingeführt, die als „generische Operator-Schablone“ fungiert. Dabei besteht ein Arbeitsgang aus Arbeitsschritten und steht in Relation zu Produkt, Bauteil, Material (Schrauben und Hilfsmittel), Werkzeug und Werker. Die Arbeitsschritte sind manuelle Montageprozesse (Fügen, Handhaben, Justieren und Sonderoperationen), die aus der DIN 8593 und der VDI 2860 abgeleitet werden. Die Modellierung einer Fügeoperation erfolgt in drei Schritten bzw. bildet die drei Zustände: (1) Ausgangssituation (Zustand Basisbauteile, Fügebauteile und verfügbare Werkzeuge), (2) Aktion (Fügevorgang selbst) und (3) Endsituation (Zustand Basisbauteil und Fügebauteil) ab. Die Textanweisungen selbst werden manuell erstellt. [AEHN17]

Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess

LUŠIĆ entwickelt in seiner Dissertation ein Konzept zur simultanen Erstellung von „Werkerinformationen“. Dazu wird ein Informationsmodell eingeführt, das alle erforderlichen Informationen für die systematische Prozessbeschreibung enthält. Die Montageprozesse werden gemäß der DIN-Norm 8593 und VDI-Richtlinie 2860 in ihre elementaren Bestandteile „dividiert“. Beispielsweise setzt sich das Schrauben aus den Tätigkeitsumfängen Auflegen, Ineinanderschieben und Einschrauben zusammen. Ergänzend kommen Zielparameter wie Kraft oder Moment als Vorgabewerte hinzu. Dabei wird zwischen Primärfunktion (Fügen)- und Sekundärfunktion (Handhaben, Justieren, Prüfen und Sonderoperation) differenziert. Die Montageprozesse werden in Hinblick auf ihre Ausführung in drei Gruppen unterteilt: ohne Betriebsmittel, mit einfachem Werkzeug, mit motorisiertem Werkzeug. Basierend auf diesen Informationen können während des Produktentstehungsprozesses Montageanweisungen aus den strukturellen Daten von CAD-Skelettmodellen abgeleitet werden. Die Montageanimationen werden manuell durch das Bewegungsmodell der CAD-Skelettmodelle generiert, wodurch sich die geometrischen Elemente der Montageobjekte entsprechend der Montageoperation aufeinander zu bewegen. Die „Werkerinformationen“ der Fügekomponenten und zugehörigen Montageoperationen sind durch das Informationsmodell datentechnisch miteinander verknüpft. Dabei bestimmt der Grad der digitalen Produkt- und Prozessentwicklungsdaten den Umfang an nutzbaren realen bzw. virtuellen Montageinformationen. [LUŠI17]

Teach Me How! Interactive Assembly Instructions Using Demonstration and In-situ Projection

FUNK ET AL. stellen einen Ansatz vor, in dem ein erfahrener Werker die auszuführenden Montageoperationen physisch demonstriert (Programming by Demonstration) und diese mit einer Tiefenbildkamera aufgezeichnet werden. Das System besteht aus einer Kinect-Kamera und einem Beamer, die so kalibriert sind, dass Bild- und Projektionspixel übereinstimmen. Auf dieser Grundlage werden In-situ-Projektionen für den Beamer generiert, der den Werkern Montageanweisungen in Form von Konturen direkt in den

Arbeitsbereich projiziert. Grünes Licht kennzeichnet den Entnahmebehälter für Füge-
teile sowie die Montageposition auf dem Werkstückträger. Rotes Licht wird verwendet,
um Teile zu kennzeichnen, die entfernt werden sollen – etwa als Teil einer Demonta-
geanweisung, zur Korrektur fehlerhaft montierter Komponenten oder zur Entfernung
nicht benötigter Teile – und fungiert damit als visuelles Feedback für korrigierende
Eingriffe. Gelbes Licht weist auf Werkzeugpositionen hin. Das Ziel besteht in einem
Wissenstransfer innerhalb der Belegschaft. Die einmalige Durchführung der Montage-
operation durch einen erfahrenen Werker wird genutzt, um In-situ-Projektionen zu ge-
nerieren, so dass unerfahrene Werker mit diesen Instruktionen ebenfalls neue Pro-
dukte montieren können. [FUNK18]

Generation of AR-enhanced Assembly Instructions based on Assembly Features

NEB ET AL. stellen einen Ansatz zur AR-erweiterten Erstellung von Montageanweisun-
gen vor. Der Prozess beginnt mit der Bestimmung der optimalen Montagesequenz für
ein Produkt. Anschließend definiert der Montageplaner unter Nutzung seines Fachwis-
sens spezifische Montagefeatures für jede Verbindung. Diese Montagefeatures be-
schreiben typische Verbindungsarten und -bewegungen wie z. B. Stecken, Schrauben
oder Einlegen, und dienen als semantische Grundlage für die Auswahl passender Vi-
sualisierungen. Die Definition der Montagefeatures bildet die Grundlage für die Erstel-
lung von AR-basierten Montageanweisungen, indem für jedes Montagefeature eine
geeignete Animation aus einer vordefinierten Bibliothek ausgewählt wird. Zusätzlich
können manuell Textanweisungen ergänzt werden. Die so erstellten AR-Anweisungen
werden mithilfe der HoloLens-Technologie im realen Arbeitsbereich des Werkers ver-
ankert, indem sie an bestimmten Stellen positioniert werden. [NEB18]

Automated Information Supply of Worker Guidance Systems in Smart Assembly Envi- ronment

REISINGER ET AL. stellen ein Konzept vor, bei dem der Montageprozessplaner mithilfe
einer Content-Authoring-Suite, einer Eingabesoftware zur strukturierten Erfassung und
Ergänzung von Montageinformationen, die Montageoperationen und Vorrangbezie-
hungen für jede Produktvariante aus einem 3D-CAD-Modell festlegt. Dabei werden
manuell Zwischenschritte und Informationen ergänzt, die nicht automatisch aus dem
CAD-Modell extrahiert werden können. Auf dieser Grundlage kann anschließend mit-
hilfe einer nicht näher beschriebenen Converter-Software ein generischer Montage-
plan erstellt werden. Dieser wird durch einen selbst entwickelten Media Generator au-
tomatisch mit Medien wie Texten, Bildern und Animationen angereichert, die direkt aus
dem CAD-Modell abgeleitet werden. Die textliche Beschreibung einzelner Montage-
operationen wird automatisch auf Grundlage definierter Textmodule generiert und ent-
hält Informationen über montierte Komponenten, die Vorgehensweise und benötigte
Werkzeuge. Die Montageanweisungen werden automatisch in lokale Datenbanken
hochgeladen, die sich in den Montagestationen befinden, in denen KAS eingesetzt
werden. [REIS18; REIS21]

Intelligent Authoring and Management System for Assembly Instructions

CLAEYS ET AL. entwickeln einen Ansatz zur Erstellung und Verwaltung von Montageanweisungen, angepasst an Produktionsumgebungen mit hoher Variantenvielfalt und geringen Stückzahlen. Das vorgestellte Framework zielt darauf ab, häufig auftretende Mängel wie Unvollständigkeit, Fehleranfälligkeit und übermäßige Komplexität in der Montageanweisungserstellung zu beheben. Ein zentrales Element des Systems ist der „Assembly information configurator“, der Daten aus Enterprise Resource Planning (ERP)-, Manufacturing Execution Systemen (MES) und CAD-Systemen nutzt, um die initiale Montageanweisungserstellung zu unterstützen. Durch die Kombination verschiedener Autorentools wird die Nutzung von vorverarbeiteten Informationen und historischen Montageanweisungen systematisiert und somit eine kürzere Zeit zur Erstellung und Aktualisierung von Montageanweisungen erreicht. Kontextabhängige Anmerkungen ermöglichen es, dass nur erfahrene Werker neue oder fehlende Informationen in Form von Bildern, Texten und Videos hinzufügen. Das Kontextmodell (vgl. CLAE16 in Kapitel 3.1), das Bediener-ID, verwendete Werkzeuge und Materialien, die Montagestation, die Körperhaltung und die Kompetenzstufe umfasst, wird zur Kontextualisierung der Anmerkungen verwendet. Der Aufwand zur Erstellung von Montageanweisungen, verursacht durch Variantenvielfalt, wird durch eine Ähnlichkeitsanalyse der Montageaufgabe, der dazu benötigten Werkzeuge und des Prozesses reduziert. Dabei werden Anmerkungen klassifiziert und mit bereits verfügbaren Montageinformationen verknüpft. [CLAE19]

Tool-based automatic generation of digital assembly instructions

RUSCH ET AL. beschreiben einen Ansatz zur automatischen Erstellung digitaler Montageanweisungen. Dieser basiert auf einem eigens entwickelten Editor, der durch Plugins an spezifische Anforderungen angepasst werden kann. Der Erstellungsvorgang der Montageanweisungen beginnt mit der Verarbeitung von Excel-Templates, die eine Teileliste und eine Vorrangfolge enthalten. Diese Daten werden zunächst extrahiert, ontologisch abgebildet und mit den relevanten Montageinformationen verknüpft. Die Unified Modeling Language (UML)-basierte Ontologie modelliert den gesamten Prozess und ermöglicht die Einbindung von ERP-Systemen. Die fertigen Montageanweisungen werden anschließend im „Assistenten“ einem GUI angezeigt, um den Werker durch den Montageprozess zu führen. [RUSC21]

Semi-automatic extraction of digital work instructions from CAD models

GORS ET AL. präsentieren einen teilautomatisierten Ansatz zur Erstellung digitaler Montageanweisungen, der mit einer Heuristik zur Bestimmung der optimalen Reihenfolge der Montageoperationen beginnt. Für jeden Schritt werden automatisch eine Bezeichnung, eine Standardtextbeschreibung „Insert part in the assembly“ sowie ein Vorschaubild aus dem CAD-Modell generiert. Der Prozessplaner in der Arbeitsvorbereitung kann diese Informationen bei Bedarf manuell ergänzen und den Blickwinkel des

CAD-Bildes sowie den Text der Anweisungen anpassen. Die fertigen Anweisungen können als Text, Bilder, 3D-Modelle oder Animationen exportiert werden. [GORS21]

Automatic Generation of Assembly Instructions by Analyzing Process Recordings – A Concept Overview | AGASTIK – Automatic Generation of Assembly Sequence and Times from Implicit Knowledge

BURGGRAEF ET AL. präsentieren im Rahmen des Forschungsprojekts **AGASTIK** ein Konzept, das im Ansatz ähnlich zu FUNK ET AL. 2018 ist und die automatische Erstellung von Montageanweisungen durch die Analyse von Videoaufnahmen der Montageprozesse ermöglicht. Der Fokus liegt auf der kamerabasierten Prozesserfassung von manuellen Montageoperationen, die an Einzelmontagestationen durchgeführt werden. Die Stationen sind mit 2D-Kameras ausgestattet, die den gesamten Montagedurchgang aufzeichnen, um das implizite Wissen der Mitarbeiter festzuhalten. Die aufgezeichneten Videos werden anschließend durch maschinelle Lernalgorithmen analysiert, um automatisch Montageanweisungen zu generieren, die Werkern über eine Benutzeroberfläche angezeigt werden. Das vorgestellte Framework zur Erstellung der Montageanweisungen ist in drei Hierarchieebenen gegliedert: (1) den gesamten „Montageprozess“, (2) die „Montageabschnitte“ – zusammengehörige Prozesssequenzen, die z. B. zu einem Zwischenprodukt führen – und (3) die „Montageschritte“. Jede dieser Ebenen liefert spezifische Informationen, die für die korrekte Durchführung der jeweiligen Arbeitsschritte erforderlich sind. Das Konzept kombiniert aufeinander folgende Module: eines zur Datenerfassung (Videoaufzeichnung), eines zur Analyse der aufgezeichneten Aktivitäten und ein Modul zur Generierung eines strukturierten Prozessmodells, das die Montageanweisungen in einer leicht verständlichen Form abbildet. [BURG24]

Zwischenfazit:

Die Literaturrecherche offenbart unterschiedliche Herangehensweisen zur Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen. Tabelle 3-2 fasst die vorgestellten Ansätze zusammen und ermöglicht einen Vergleich.

1. Digitale Modellierung der Zusammenhänge zwischen Produkt-Prozess-Betriebsmittel (BM in Tabelle 3-2): Die digitale Modellierung (z. B. durch Entwurfsmuster) ermöglicht eine effiziente und flexible Erstellung von Montageanweisungen, indem die relevanten Informationen von Montageprozessen generisch und ganzheitlich als Grundlage zur Montageanweisungserstellung verwendet werden.
2. Normbasierte Anweisungserstellung: Montageanweisungen insbesondere Textanweisungen werden anhand von etablierten Normen (z. B. DIN-Norm 8593 und VDI-Richtlinie 2860) erstellt, um eine konsistente und qualitätsgesicherte Strukturierung und Darstellung der Informationen zu gewährleisten.
3. System- und Datenintegration: Häufig werden CAD-Modelle als Ausgangsbasis zur Montageanweisungserstellung verwendet. Einige Ansätze gehen darüber

hinaus und greifen zusätzlich auf Daten aus ERP-Systemen zurück. Die Nutzung von Tiefenbildkameras zur Aufzeichnung der Montageoperationen ermöglicht eine direkte Ableitung der Montageanweisungen aus dem Bildmaterial (Programming by Demonstration).

4. Visualisierung: Viele Ansätze spezialisieren die Montageanweisungserstellung auf bestimmte Ausgabeeinheiten wie etwa Touchscreens oder AR-Brillen.

Tabelle 3-2: Zusammenfassung und Vergleich identifizierter Ansätze im Themenfeld II: Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen

Autor	Modellierungsdimensionen	Normbasierte Erstellung	System-/ Datenintegration	Visualisierung
LANG07	Produkt, Prozess, BM	Konventionen interne technische Dokumentation	ERP, PDM, PPS & CAD	Bildschirm
MADE10	k.A.	Simplified Technical English (ASD-STE100)	k.A.	AR-Brille
WIES14	Produkt, Prozess, BM	DIN 8593 & VDI 2860	k.A.	Bildschirm & In-situ-Projektion
AEHN17	Produkt, Prozess, BM	DIN 8593 & VDI 2860	k.A.	Touchscreen
LUSI17	Produkt, Prozess, BM	DIN 8593 & VDI 2860	CAD	Touchscreen
FUNK18	Produkt, Prozess, BM	k.A.	Kamerabasierte Prozesserfassung	In-situ-Projektion
NEB18	Produkt, Prozess	k.A.	CAD	AR-Brille
REIS18 REIS20	Produkt, Prozess	k.A.	CAD	Geräteunabhängig
CLAE19	Produkt, Prozess, BM	k.A.	ERP, MES, PLM & CAD	k.A.
RUSC20	Produkt, Prozess, BM	DIN 8593	ERP, CAD	Bildschirm
GORS21	Produkt, Prozess	k.A.	CAD	Bildschirm
BURG24	Produkt, Prozess, BM	DIN 8580	Kamerabasierte Prozesserfassung	Bildschirm

3.3 Interdisziplinäre Ansätze

In diesem Kapitel werden Ansätze vorgestellt, die sich nicht eindeutig Themenfeld I oder II zuordnen lassen, jedoch allgemeine Relevanz für den Forschungskontext dieser Dissertation aufweisen oder in beiden Bereichen Beiträge liefern. Es handelt sich um Ergebnisse der Rückwärts- und Vorwärtsrecherche aus den beiden systematischen Literaturrecherchen für Kapitel 3.1 und 3.2.

Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage

HOLD entwickelt im Rahmen seiner Dissertation ein Vorgehensmodell, das die Konfiguration unterschiedlicher KAS unter Berücksichtigung der individuellen Merkmale und Eigenschaften des Werkers sowie sich dynamisch verändernder Anforderungen der Organisation bzw. Arbeitsaufgabe ermöglicht. Dies soll eine quantifizierte Investitionsentscheidung für die Einführung von KAS vereinfachen. Zur Priorisierung und Auswahl der Komponenten eines KAS wird ein genetischer Algorithmus eingeführt, wobei entsprechende Nebenbedingungen definiert und mathematisch beschrieben werden. Das Vorgehensmodell beruht auf einem Regelwerk zur Beeinflussung von Ausführungszeit, Lern- und Trainingszeit sowie menschlichen Fehlern durch KAS. Die Basis hierfür ist die erweiterte MTM-UAS Analyse. Diese ermöglicht basierend auf den Eigenschaften der vorliegenden Montageoperationen eine quantifizierte Entscheidungsunterstützung in den drei genannten Bereichen. Die Erstellung von Montageanweisungen und der damit verbundene Aufwand sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. [HOLD20]

Einführung Kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage | SynDiQuAss

MERKEL entwickelt in seiner Dissertation und im Rahmen des Forschungsprojekts **SynDiQuAss** ein Systemmodell zur bedarfsgerechten Auswahl von Assistenzfunktionen, das die Klassen, Komponenten und Technologien mit entsprechenden Fähigkeiten enthält. Assistenzfunktionen werden durch die Beschreibung des Informationsflusses zwischen Assistenzsystem, Werker, IT-Systemen und Montagearbeitsplatz spezifiziert. Ziel dieses UML-basierten Systemmodells ist es, eine Struktur für KAS bereitzustellen, die die optimale Komponentenauswahl im Einführungsprozess für die manuelle Montage erleichtert. Die Methode zur Einführung besteht aus fünf Schritten, (1) Bedarfsanalyse, (2) Partizipative Technologievorauswahl, (3) Konzeptionierung von Assistenzfunktionen, (4) Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen, (5) Wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen. Der Fokus liegt dabei auf der bedarfsgerechten Entwicklung von Assistenzfunktionen und der Einbindung der zukünftigen Nutzer zur Steigerung der Akzeptanz. Auf die Art der Gestaltung und Erstellung von Montageanweisungen wird nicht näher eingegangen. [MERK21]

Spatial Augmented Reality in der industriellen Großgeräte- und Baustellenmontage: Entwicklung eines Assistenzsystems mit dynamischer In-situ-Projektion und nutzeradaptiver Gesteninteraktion

RUPPRECHT entwickelt ein auf SAR basierendes KAS für den Einsatz in der Großgeräte- und Baustellenmontage. Zur Umsetzung werden verschiedene Konstellationen eines Beamers mit beweglichem Spiegel, eines Laserprojektors und eines PC-Terminals getestet und miteinander verglichen. Die Steuerung des Systems erfolgt nutzeradaptiv durch den Menschen. Als Interaktionsform werden Gesten verwendet, um zwischen verschiedenen Informationen oder Montagepositionen zu wechseln. Die Geste der „offenen Hand“ dient dabei zum Weiterschalten von Montageanweisungen, während die „Faust“ zum Zurückschalten verwendet wird. Die technische Umsetzung wird durch den Einsatz einer RealSense-Kamera und eines You Only Look Once (YOLO) Algorithmus für die Objekterkennung ermöglicht. Für die Gestenerkennung wird ein eigener Algorithmus mittels Deep Learning trainiert. Dadurch ist es möglich, dass die Projektion dem Menschen dynamisch folgt, so dass sie sich immer in seinem Nahfeld befindet. Die Art der Gestaltung und Erstellung von Montageanweisungen wird nicht näher thematisiert. [RUPP21]

Dynamisches und individuelles Werkerinformationssystem für die manuelle Serienmontage

TEUBNER entwickelt ein „Werkerinformationssystem“, das dynamische Informationen, die sich an Produkt und Prozess anpassen, sowie individuelle Informationen, die auf den einzelnen Werker zugeschnitten sind, bereitstellt. Das modulare System nutzt Datensätze und Regelwerke, um „Werkerinformationen“ in den Klassen Aktivität, Warnung, Hinweis, Änderung, Montagefehler, Kommentar und Erläuterung zu verwalten. Dynamische Systemfunktionen ermöglichen eine variantenabhängige und auftragspezifische Informationsselektion. Ein Beispiel hierfür ist die Änderungsmarkierung in Montageanweisungen, die Abweichungen vom bekannten Vorgehen vorübergehend hervorhebt, um sicherzustellen, dass Produkt- und Prozessänderungen nicht übersehen werden. Individuelle Systemfunktionen dienen der rollenspezifischen Informationsselektion. Es werden sechs Rollen (Werker, Springer, Lerner, Lehrer, Leistungsgeminderter und Unterstützer) eingeführt. Diese werden mit einer arbeitsplatzspezifischen Qualifikationsmatrix kombiniert, die sich im Zuge des Lernprozesses verändert und auf dem ILUO-Stufenmodell basiert – einem industriell weit verbreiteten Modell zur Einstufung von Kompetenzen in vier Stufen. Ein Werker beginnt in der ersten Stufe (Stufe I), in der er alle Tätigkeiten kennt und versteht. Sobald er diese Tätigkeiten in der geforderten Qualität ausführen kann, erfolgt eine Hochstufung auf Stufe L. erreicht er zusätzlich die geforderte Quantität, gelangt er in Stufe U. Werker, die die Stufe O erreichen, zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Lage sind, ihr Wissen und Können weiterzugeben und neue Werker einzuarbeiten. Die Einstufung in die jeweilige Stufe erfolgt durch den Montagebereichsleiter.

Als User Interface wird ein Bildschirm verwendet. Es sieht neben aktivitätsbeschreibenden Werkerinformationen separate Anzeigefelder für Warnungen, Hinweise, Änderungs-, Montagefehler-, Kommentar- und Erläuterungsinformationen vor. Dabei wird jedoch nicht auf die Erstellung von Montageanweisungen und den damit verbundenen Aufwand eingegangen. [TEUB21]

Entwicklung eines intelligenten Kognitiven Assistenzsystems für dynamische Produktionsumgebungen

BASHIR entwickelt im Rahmen seiner Dissertation ein KAS für die Nacharbeit bzw. Demontage in vier Entwicklungsstufen. Der Pilotarbeitsplatz beinhaltet ein Mitarbeiterführungssystem, das über eine bildschirmgebundene Webapplikation bildliche und textuelle Anweisungen zur De-/Montage an den Werker übermittelt. Zusätzlich können Informationen per Beamer auf die Arbeitsfläche projiziert und Schraubpunkte mithilfe eines Laserprojektors dargestellt werden. Der Werker kann sich über eine ID anmelden und den Nacharbeitsauftrag durch das Scannen eines Fehlercodes aufrufen. In einer Datenbank werden Qualifikationsklassen (Anfänger, Fortgeschrittener, Experte) hinterlegt, die auf der Einschätzung des Vorgesetzten und einer „Prozessvertrautheit“ basieren, die aus der Fehlerquote und dem Zeitaufwand im Vergleich zu anderen Workern abgeleitet wird. Dies dient als Grundlage, um die Montageanweisungen „dosiert“ in ihrer Informations-tiefe an den Werker anzupassen.

In der ersten Entwicklungsstufe greift das KAS auf einen digitalen Nacharbeitsplan zu, der die Prozessdaten in einer Datei im JavaScript Object Notation (JSON)-Format hinterlegt. Jeder Prozess im Nacharbeitsplan ist mit einer entsprechenden JSON-Datei verknüpft. Auf Grundlage dieser Plandaten steuert das System vordefinierte Betriebsmittel, die in seine Peripherie integriert sind, an. Hierzu zählen ein elektrischer Drehmomentschrauber, eine Waage, eine 2D- und eine 3D-Kamera sowie eine Kommissionierbox. Die zweite Entwicklungsstufe sieht eine graphenbasierte Informationsstruktur vor, um fallabhängige Nacharbeitspläne zu ermöglichen. Die Informationsstruktur basiert auf einem Produktzustandsgraphen, der mit Prozessdaten angereichert wird. Bestimmte Produktzustände werden markiert, um Fehler zu kennzeichnen und mit Fehlercodes zu assoziieren. Dazu wird ein Pathfinding-Algorithmus verwendet. Da der Fehlercode auf einer nicht immer fehlerfreien Ursachenbewertung beruht, kann der Werker in der dritten Entwicklungsstufe den Nacharbeitsplan anpassen, wenn eine fehlerhafte Ursachenbewertung vermutet wird. In der vierten Stufe bewertet das Assistenzsystem den Produktzustand und erkennt Abweichungen ohne Eingabe eines Fehlercodes. Dazu wird der Produktzustand erfasst und geeignete Maßnahmen ergriffen, um den realen und digitalen Produktzustand zu synchronisieren. Die Zustandsynchronisation zwischen realem und digitalem Produktzustand basiert auf einem Belief State eines Markov-Modells. Auf die Art der Gestaltung und Erstellung von Montageanweisungen wird nicht näher eingegangen. [BASH23]

Zwischenfazit:

Die in Kapitel 3.3 vorgestellten interdisziplinären Ansätze beleuchten zentrale Fragestellungen bei der Implementierung und Evaluation Kognitiver Assistenzsysteme in der Montage, wie durch die Arbeiten von HOLD und MERKEL dargestellt. Sie unterstreichen die Notwendigkeit, individuelle Merkmale der Werker und dynamische Anforderungen im Produktänderungsfall zu berücksichtigen. Technische Umsetzungen, wie sie von RUPPRECHT, TEUBNER und BASHIR beschrieben werden, zeigen Lösungsansätze, die von SAR bis hin zu komplexen „Werkerinformationssystemen“ reichen. Besonders hervorzuheben ist der Einsatz unterschiedlicher Informationsausgabeeinheiten wie Touchscreens, konventionelle Bildschirme sowie In-situ-Projektionen (Beamer- und Laserprojektoren), die die Flexibilität und Adaptivität der Systeme in praktischen Anwendungen demonstrieren. BASHIRS Ansatz veranschaulicht die komplementäre Integration dieser Technologien, um den Gesamtnutzen für den Werker zu maximieren. Der Ansatz von TEUBNER ergänzt diese Perspektive um die Dimension der Nutzeradaptivität und eine dynamische Anpassung an Produktänderungen. Das verwendete ILUO-Stufenmodell bietet einen vielversprechenden Ansatz, um die Informationsbereitstellung personenindividuell und kompetenzgerecht zu gestalten.

3.4 Konkretisierung der Forschungslücke und Ableitung des Handlungsbedarfs

Der in der voranstehenden Analyse aufgearbeitete Stand der Forschung umfasst 29 wissenschaftliche Publikationen, die im Rahmen von zwei systematischen Literaturrecherchen identifiziert wurden. Dabei entfallen zwölf Publikationen auf nutzeradaptive Kognitive Assistenzsysteme (Themenfeld I) und zwölf Publikationen behandeln die Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen (Themenfeld II). Die verbleibenden fünf Publikationen widmen sich gebietsübergreifenden Querschnittsthemen (Themenfeld III). Es fällt auf, dass ein Großteil der rezensierten Veröffentlichungen aus Zentraleuropa stammt, was sich durch die in der Einleitung erörterten Rahmenbedingungen der variantenreichen Serienmontage an Hochlohnstandorten erklären lässt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird in diesem Kapitel die spezifische Forschungslücke elaboriert und der Handlungsbedarf für die Weiterentwicklung Kognitiver Assistenzsysteme zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen begründet.

3.4.1 Ableitung der Bewertungskriterien

Zur systematischen Bewertung des Forschungsstandes werden zehn Bewertungskriterien definiert, die entsprechend der in Kapitel 1.2 beschriebenen Teilziele in zwei Bereiche gegliedert sind. Diese Kriterien leiten sich aus der Anwendung der Wandlungsbefähiger (vgl. Kapitel 2) im Kontext Kognitiver Assistenzsysteme sowie den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung ab. Ziel ist es, zu analysieren, inwieweit bestehende Forschungsansätze die folgenden Kriterien berücksichtigen und umsetzen.

Nutzeradaptive Kognitive Assistenzsysteme:

- Dynamische Nutzeradaptivität: Berücksichtigt der Ansatz die personenindividuelle und dynamische Anpassung des KAS an die Kompetenzen der Werker?
- Skalierung der Art und Tiefe der Montageanweisung: Wird die Skalierung der Art und Tiefe der Montageanweisungen als Wandlungsbefähiger berücksichtigt?
- Schwellwerte/Kriterien zur Anpassung der Informationsbereitstellung: Sind klare Schwellwerte oder Kriterien zur Anpassung der Montageanweisungen hinsichtlich Art und Tiefe definiert?
- Kompetenzstufen zur Nutzeradaptivität: Wird die Einteilung in verschiedene Kompetenzstufen zur dynamischen Anpassung der Montageanweisungen berücksichtigt?
- Technologieakzeptanz: Wird die nutzeradaptive Gestaltung von KAS gezielt als Methode zur Steigerung der Akzeptanz eingesetzt?

Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen:

- Effizienzsteigerung: Trägt der Ansatz zur Beschleunigung der Montageanweisungserstellung bei?
- Struktur & Normkonformität: Wird eine systematische und normbasierte Strukturierung der Montageanweisungen berücksichtigt?
- Modularität: Sind die Montageanweisungen modular aufgebaut, um eine kompetenzgerechte Skalierung in Art und Tiefe zu ermöglichen?
- Universalität: Sind die Montageanweisungen auf verschiedene manuelle Montageprozesse und unterschiedliche Produktarten übertragbar?

3.4.2 Bewertung und Diskussion bestehender Forschungsansätze

Die mit Hilfe der zuvor eingeführten Kriterien durchgeführte Bewertung bestehender Forschungsansätze ist in Tabelle 3-3 abgebildet. Leere Harvey Balls verdeutlichen, dass das Kriterium weder aufgegriffen noch explizit erwähnt wurde und somit nicht im Kontext der Zielsetzung der vorliegenden Dissertation behandelt wurde. Halbe Harvey Balls zeigen an, dass das Kriterium in der Publikation erwähnt, jedoch nicht umfassend im Sinne der formulierten Zielsetzung der Dissertation behandelt wurde. Volle Harvey Balls symbolisieren, dass das Kriterium in der Publikation nicht nur erwähnt, sondern auch nachvollziehbar im Rahmen der formulierten Zielsetzung der Dissertation behandelt und erläutert wurde.

Tabelle 3-3: Bewertung der untersuchten Forschungsansätze

	Bewertungskriterien								
	Nutzeradaptivität					Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen			
	Dynamische Nutzeradaptivität	Skalierung der Art und Tiefe der Montageanweisung	Schwellwerte/Kriterien zur Anpassung der Informationsbereitstellung	Kompetenzstufen zur Nutzeradaptivität	Technologieakzeptanz	Effizienzsteigerung	Struktur & Normkonformität	Modularität	Universalität
Bewertungsskala: <input type="radio"/> nicht erfüllt <input checked="" type="radio"/> teilweise erfüllt <input checked="" type="radio"/> erfüllt									
Kapitel 3.1 Nutzeradaptive Kognitive Assistenzsysteme									
Bannat (2014)	●	●	○	○	●	●	○	●	●
Funk et al. (2015)	●	●	●	●	●	○	○	○	●
Koelz et al. (2015)a,b	●	●	●	●	●	○	○	○	○
Syberfeldt et al. (2015)	●	●	○	●	●	○	○	○	○
Galaske & Anderl (2016)	●	●	●	●	●	○	○	●	●
Claeys et al. (2016), (2018)	●	●	○	●	●	○	○	●	●
Baechler et al. (2018)	●	●	○	●	●	○	○	○	○
Breitkopf (2018)	●	●	●	●	●	○	●	○	●
Haslgruebler et al. (2018)	●	○	○	●	○	○	○	○	○
Adler & Dander (2019), Dander et al.(2021)	●	●	○	●	●	○	○	○	○
Petzold et al. (2020)	●	○	○	●	●	○	○	●	○
Sehr et al. (2021)	●	●	●	●	●	○	○	●	○
Kapitel 3.2 Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen									
Lang (2007)	●	●	○	○	●	●	●	●	●
Mader & Urban (2010)	●	●	○	○	○	●	●	●	●
Wiesbeck (2014)	●	●	●	○	●	●	●	●	●
Aehnelt (2017)	●	●	○	○	○	●	●	●	●
Lusic (2017)	○	●	○	○	○	●	●	●	●
Funk et al. (2018)	○	○	○	○	○	●	○	●	●
Neb & Strieg (2018)	○	○	○	○	○	●	○	●	●
Reisinger (2018), (2021)	○	○	○	○	○	●	○	●	●
Claeys et al. (2019)	●	●	○	●	●	●	○	●	●
Rusch et al. (2020)	●	●	○	○	○	●	●	●	●
Gors et al. (2021)	○	●	○	○	○	●	○	●	●
Burggraef et al. (2024)	○	○	○	○	○	●	●	○	●
Kapitel 3.3 Interdisziplinäre Ansätze									
Hold (2020)	●	●	●	○	●	○	○	○	●
Merkel (2021)	●	○	○	○	●	○	○	●	○
Teubner (2021)	●	●	●	●	●	○	○	●	●
Rupprecht (2022)	●	○	○	○	●	○	○	●	○
Bashir (2023)	●	●	○	●	●	○	○	●	●

Die Bewertung des Forschungsstandes zeigt, dass kein Ansatz die Kriterien der forschungsleitenden Zielsetzung (vgl. Kapitel 1.2) hinreichend erfüllt. Im Themenfeld I zeigt sich, dass viele Ansätze zur Nutzeradaptivität existieren, die fast alle eine Skalierung der Art und Tiefe der Montageanweisung als Wandlungsbefähiger zur nutzeradaptiven Informationsbereitstellung verwenden. Gleichzeitig wird jedoch die Effizienzsteigerung bei der Erstellung der Montageanweisung nicht näher behandelt und Modularität und Universalität als Wandlungsbefähiger in der Gestaltung der Anweisungen kaum berücksichtigt. Dadurch weisen die bestehenden Ansätze im Themenfeld I Defizite im Hinblick auf die Standardisierung und Effizienz der Montageanweisungserstellung auf, was die Reaktionsfähigkeit des KAS auf Marktveränderungen beeinträchtigt und somit die Wandlungsfähigkeit des Montagesystems, in dem es eingesetzt ist, verringert. Mit Ausnahme der Arbeiten von KOELZ ET AL. und FUNK ET AL., die spezifische Schwellwerte für die Anpassung der Informationstiefe vorstellen, fehlen des Weiteren klare Kriterien für die personenindividuelle Einordnung der Werker in Kompetenzstufen. Obwohl sowohl die Technologieakzeptanz als auch Aspekte der Nutzeradaptivität in vielen Ansätzen berücksichtigt werden, bleibt die Verknüpfung mit einer systematisch effizienten Anweisungserstellung bisher weitgehend unberücksichtigt.

Erwartungsgemäß greifen im Themenfeld II einige Ansätze auf eine strukturierte normbasierte Sprache zur Montageanweisungserstellung zurück. Die meisten Ansätze nutzen, oft ohne es explizit zu benennen, Modularität und Universalität zur Gestaltung von Montageanweisungen. Alle zielen darauf ab, die Erstellung von Montageanweisungen zu beschleunigen und damit effizienter zu machen. Die Mehrzahl der Ansätze stellt keine integrierte Lösung für eine nutzeradaptive Gestaltung der KAS dar. Die Notwendigkeit einer dynamischen Skalierung der Montageanweisungsart und -tiefe in Hinblick auf die Kompetenzstufe des Werkes wird weitgehend unzureichend behandelt.

Die Ansätze im Themenfeld III berücksichtigen in Bezug auf die Erstellung von Montageanweisungen fast alle die Wandlungsbefähiger Modularität und Universalität. Es ist erkennbar, dass einige Ansätze eine kompetenz- und personenindividuelle Anpassung der Informationsbereitstellungsart und -tiefe der Montageanweisung verfolgen, sich dabei aber kaum mit einer strukturierten und normbasierten Montageanweisungserstellung auseinandersetzen.

Insgesamt zeigt die Diskussion der Bewertung des Forschungsstandes in Tabelle 3-3 in Verbindung mit der Marktrecherche aus dem Grundlagenteil, zu sehen in Tabelle A-1 und Tabelle A-2, dass kein bestehender Ansatz und keine bestehende Lösung am Markt die Nutzeradaptivität effektiv mit der beschleunigten Erstellung von standardisierten Montageanweisungen kombiniert, um die Wandlungsfähigkeit Kognitiver Assistenzsysteme zu erhöhen. Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf für die Entwicklung einer integrativen Lösung, die sowohl die Nutzeradaptivität – und damit den Menschen als zentralen Wandlungsbefähiger – berücksichtigt, als auch die Effizienz und

Wirtschaftlichkeit der Montageanweisungserstellung verbessert, um die Wandlungsfähigkeit des gesamten Montagesystems, in dem KAS eingesetzt werden, gezielt zu steigern.

Forschungslücke
Derzeit existiert kein integrierter Ansatz, der die Nutzeradaptivität mit der beschleunigten Erstellung von standardisierten Montageanweisungen für Kognitive Assistenzsysteme zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit kombiniert.

Die Herleitung der Forschungslücke untermauert die in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen und verdeutlicht ihre inhaltliche Relevanz.

4 Ableitung der Anforderungen und methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel werden auf Grundlage der Forschungsfragen aus Kapitel 1.2 sowie der Untersuchung des Forschungsstandes und der daraus abgeleiteten Forschungslücke aus Kapitel 3 die inhaltlichen und technischen Anforderungen an ein KAS zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von manuellen Montagestationen abgeleitet. Darüber hinaus wird die methodische Vorgehensweise erläutert, die zur Beantwortung der Forschungsfragen und zur Umsetzung der definierten Anforderungen dient.

4.1 Ableitung der Anforderungen

Der Lebenszyklus eines wandlungsfähigen Montagesystems ist, wie bereits in Kapitel 2.2.3 beschrieben, in der Regel länger als der des zu montierenden Produkts. Daher sollte auch das KAS so gestaltet werden, dass es die Wandlungsfähigkeit des Systems aktiv unterstützt und fördert, um die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Systems zu gewährleisten. Andernfalls kann der Einsatz von KAS die Wandlungsfähigkeit des Montagesystems beeinträchtigen. Um dies zu vermeiden, sollten KAS so gestaltet werden, dass sie wandlungsfähig sind, insbesondere in Bezug auf den zentralen Wandlungstreiber Produktveränderungen.

Die Analyse, bestehend aus den Grundlagen in Kapitel 2 und der Untersuchung des Stands der Forschung in Kapitel 3, führt zu der Schlussfolgerung, dass ein wandlungsfähiges KAS die Flexibilität des Montagesystems erhöhen sollte, indem es den Werker in die Lage versetzt, eine größere Produktvarianz personenindividuell und kompetenzgerecht zu beherrschen. Somit kann durch das KAS die Lerngeschwindigkeit erhöht und der vorgehaltene Fähigkeitsbereich, in dem die Werker agieren, erweitert werden. Darüber hinaus führt eine schnellere und dynamische Erstellung von Montageanweisungen dazu, dass die „Time-to-Market“ neuer Produkte verkürzt werden kann. Da auf diese Weise der vorgedachte Lösungsraum zur Reaktion auf Veränderungen durch das KAS vergrößert wird und der „Start of Production“ im Produktveränderungsfall beschleunigt wird.

Zur Erreichung dieser beiden Gestaltungsziele werden die Anforderungen an die Dissertation in inhaltliche bzw. theoretisch-konzeptionelle Aspekte und technische, umsetzungsbezogene Aspekte untergliedert. Die inhaltlichen Anforderungen werden weiter in die Bereiche Nutzeradaptivität und Montageanweisungserstellung gegliedert, da diese beiden Felder entscheidend sind, um die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit eines Kognitiven Assistenzsystems sicherzustellen. Ein zentraler Bestandteil der technischen, umsetzungsbezogenen Aspekte ist die demonstratorbasierte Umsetzung, durch die die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Konzepte unter realitätsnahen Bedingungen überprüft und veranschaulicht wird.

Inhaltliche Anforderungen

Nutzeradaptivität

- *Dynamische Anpassung der Informationsbereitstellung*: Die Informationsbereitstellung soll dynamisch und kompetenzgerecht an die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Werkers angepasst werden. Hierzu soll der Wandlungsbefähiger „Skalierbarkeit“ genutzt werden, um die Art und Tiefe der Montageanweisung so anzupassen, dass Über- oder Unterforderung vermieden wird.
- *Kompetenzstufen und Schwellwerte*: Die Aufgabenbeherrschung des Werkers soll anhand definierter Kompetenzstufen bewertet werden. Diese Stufen sollen mit Schwellwerten versehen werden, die in die dynamische Anpassung der optimalen Tiefe der Montageanweisungen einfließen.
- *Partizipation*: Um die Akzeptanz des nutzeradaptiven KAS zu erhöhen, soll der Werker aktiv in die Anpassung der Montageanweisungstiefe einbezogen werden. Mithilfe einer Feedbackfunktion soll der Werker die vorgeschlagene schwellwertbasierte Tiefe der Anweisungen bestätigen, ablehnen oder selbst anpassen können, um eine subjektiv empfundene Bevormundung zu vermeiden.

Montageanweisungserstellung

- *Nutzung vorhandener Informationen*: Vorhandene Informationen aus der Arbeitsvorbereitung wie MTM-Analysen oder Montagevorranggraphen sollen zur Montageanweisungserstellung genutzt werden. Dies ermöglicht eine nahtlose Integration bestehender Daten und sorgt dafür, dass relevante Informationen direkt in den Anweisungserstellungsprozess einfließen, was die Effizienz erhöht.
- *Standardisierte, universelle Syntaxmuster*: Die Montageanweisungen sollen standardisiert und normbasiert sein, sodass sie unabhängig vom Ersteller einheitlich und leicht verständlich sind. Durch die Nutzung der Wandlungsbefähiger „Modularität“ und „Universalität“ sollen Syntaxmuster zur Erstellung von Anweisungen entwickelt werden, was zu einer schnelleren Erstellungszeit führt.
- *Teilautomatisierte Erstellung*: Um die Erstellung von Montageanweisungen zu beschleunigen, soll der Erstellungsprozess teilautomatisiert ablaufen. Dabei soll die Möglichkeit bestehen, fehlende Informationen manuell durch Montageprozessplaner zu ergänzen, sodass deren Expertise gezielt in die Anweisungserstellung einfließt.

Technische Anforderungen in Bezug auf die Umsetzung eines prototypischen Demonstrators

- *Umsetzung eines Kognitiven Assistenzsystems in einer manuellen Montagestation*: Zur Erprobung und Evaluierung der technischen Umsetzung der inhaltlichen Anforderungen.

- *Partizipative Gestaltung der Nutzerinteraktion:* Zur Umsetzung der inhaltlichen Anforderungen an die Nutzeradaptivität soll ein Kompetenzstufenmodell für ein Recommender-System entwickelt werden. Dieses Modell soll die kompetenzgerechte Anpassung der Montageanweisungen ermöglichen und dient zugleich als Human-Machine-Interface (HMI), sodass der Werker stets optimal unterstützt wird, ohne bevormundet zu werden.
- *Editor für die Arbeitsvorbereitung:* Ein weiterer Bestandteil der Umsetzung ist eine grafische Benutzeroberfläche (im Folgenden GUI genannt). Diese soll in der Arbeitsvorbereitung eingesetzt werden und die Erstellung von Montageanweisungen beschleunigen, indem sie diesen Prozess teilautomatisiert unterstützt. Im Hinblick auf die dynamische Anpassung der Informationsbereitstellung sollen verschiedene Montageanweisungstiefen für verschiedene Kompetenzstufen automatisch generiert werden können.

Auf dieser Basis wird im nächsten Kapitel die methodische Vorgehensweise zur Umsetzung der formulierten Anforderungen beschrieben.

4.2 Methodische Vorgehensweise

Die im Rahmen dieser Dissertation zu entwickelnde Lösung wird als (Gesamt)System verstanden. Ein System ist durch eine klare Systemgrenze definiert und kann hierarchisch in Sub- und Teilsysteme untergliedert werden. Dabei stellen die Elemente je nach Betrachtungsebene entweder Subsysteme dar oder werden als nicht weiter zerlegbare Systemelemente angesehen [DIN14, S. 21].

Zur systematischen Erfüllung der beschriebenen Anforderungen wird eine methodische Vorgehensweise in Anlehnung an das V-Modell gewählt. Da KAS als IT-Systeme sowohl Hard- als auch Softwarekomponenten umfassen (vgl. Kapitel 2.3.1) und damit als mechatronische Systeme einzuordnen sind, eignet sich das V-Modell nach VDI-Richtlinie 2206 als bewährtes Vorgehensmodell. Es beschreibt ein generisches Vorgehen für die Entwicklung mechatronischer Systeme und gewährleistet, dass sowohl die interdisziplinären als auch die systemtechnischen Aspekte berücksichtigt werden [VDI04]. Eine erfolgreiche Systementwicklung wird durch kontinuierliche Rückkopplungen in den einzelnen Entwicklungsphasen sichergestellt.

Die Vorgehensweise zur methodischen Lösungsentwicklung ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Der Ausgangspunkt sind die in Kapitel 4.1 beschriebenen Anforderungen. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 5 der Systementwurf, in dem die Gesamtfunktion der zu entwickelnden Lösung in wesentliche Teilfunktionen zerlegt wird. Anschließend wird im Rahmen des domänenspezifischen Entwurfs die Modellbildung und -analyse durchgeführt. Hierbei wird in Kapitel 5.1 in Bezug auf die Nutzeradaptivität ein Kompetenzstufenmodell modelliert und in Kapitel 5.2 die generische Modellierung montageanweisungsrelevanter Zusammenhänge manueller Montageprozesse ausgearbeitet.

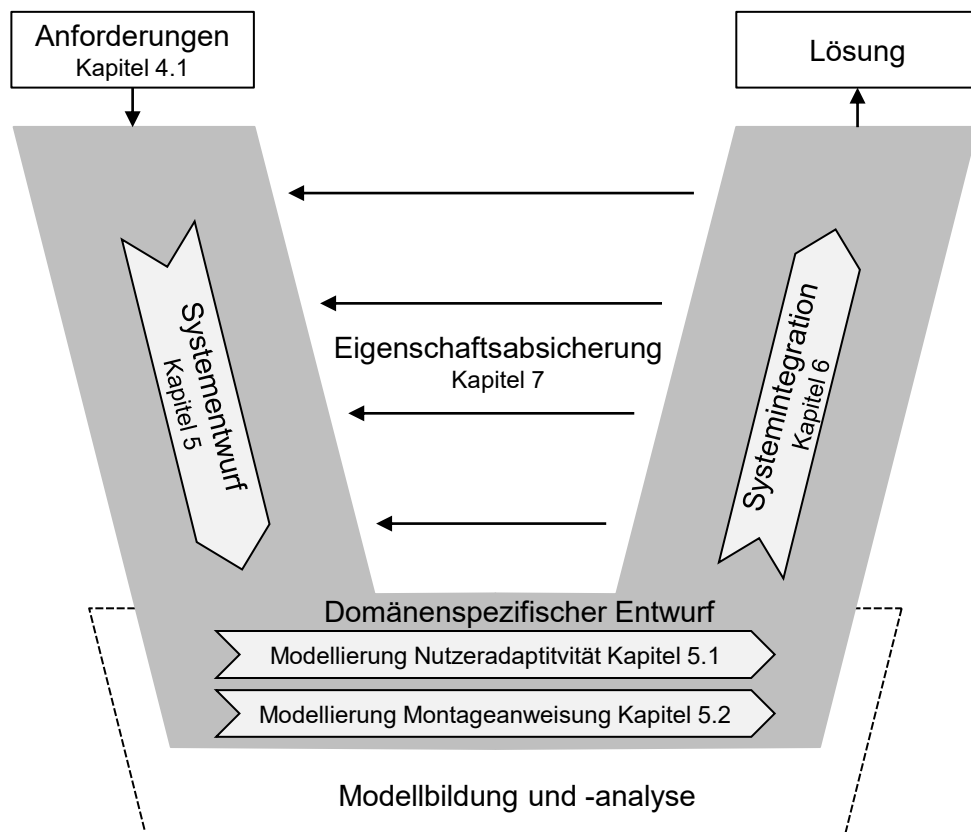


Abbildung 4-1: Vorgehenseise zur methodischen Lösungsentwicklung auf Basis des V-Modells (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI04, S. 29)

Die Ergebnisse dieser Schritte werden in Kapitel 6 im Rahmen der Systemintegration zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Dies umfasst die Umsetzung eines prototypischen Demonstrators und die Implementierung der entwickelten Teilfunktionen zur Nutzeradaptivität und zur Montageanweisungserstellung.

Zur Eigenschaftsabsicherung wird das Gesamtsystem anschließend in Kapitel 7 evaluiert und mit den ursprünglichen Anforderungen abgeglichen. Die Evaluierung umfasst sowohl die Prüfung der Funktionsfähigkeit der entwickelten Lösung als auch eine Probandenstudie, um die praktische Anwendbarkeit und Akzeptanz des Systems zu untersuchen.

5 Systementwurf und Modellbildung

Der Systementwurf bildet die Grundlage für die Entwicklung der konzeptionellen Lösung und deren anschließende Umsetzung. Dafür wird zunächst die Gesamtfunktion des Systems in wesentliche Teilfunktionen zerlegt, um eine strukturierte Implementierung und Integration zu gewährleisten. Die entwickelte Lösung wird dabei als ein ganzheitliches System betrachtet, das verschiedene Subsysteme bzw. funktionale Komponenten integriert (vgl. Kapitel 4.2). Die Gesamtfunktion des Systems leitet sich direkt aus der Zielsetzung dieser Dissertation ab: die Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen durch ein KAS. Dies setzt ein Kognitives Assistenzsystem voraus, das die Fähigkeit besitzt, sich nutzeradaptiv an unterschiedliche Werker anzupassen und schnell auf Produktwechsel zu reagieren. Zur Umsetzung dieses Ziels muss das System drei wesentliche Teilfunktionen mitbringen.

Die Teilfunktion I umfasst die softwareseitige Modellierung der Werkerkompetenz und dient der Ermittlung eines geeigneten Assistenzniveaus. Die Modellierung dieser Teilfunktion bildet die Grundlage für die produktbezogene Erfassung der Werkerkompetenz und die darauf basierende Anpassung der Art und Tiefe der Informationsbereitstellung, um die Effizienz und Akzeptanz des Systems gezielt zu steigern. Die Nutzeradaptivität wird dabei durch ein Kompetenzstufenmodell ermöglicht, das dynamische und personenindividuelle Anpassungen erlaubt.

Die Teilfunktion II besteht in der Entwicklung eines Montageanweisungsgenerators, der in dieser Dissertation den Eigennamen Assembly Instruction Generator (AIG) trägt. Der AIG unterstützt die effiziente Erstellung von Montageanweisungen, indem er diese teilautomatisiert generiert. Die Anweisungen sind modular aufgebaut und skalierbar, um unterschiedliche Kompetenzstufen der Werker zu berücksichtigen und rasch auf häufig wechselnde Produktvarianten reagieren zu können. Der AIG trägt dazu bei, den Aufwand für die Erstellung und Anpassung von Montageanweisungen zu reduzieren.

Teilfunktion III beinhaltet die Umsetzung eines prototypischen Demonstrators, der als nutzeradaptives KAS konzipiert ist und die entwickelten Teilfunktionen in eine realitätsnahe Montagestation integriert. Der Demonstrator dient als Testumgebung, um die Eigenschaften des nutzeradaptiven KAS unter praxisnahen Bedingungen zu evaluieren.

Auf Basis des beschriebenen Systementwurfs erfolgt in diesem Kapitel die konzeptionelle Modellierung der Teilfunktionen I und II, die als theoretischer Bezugsrahmen für die anschließende Umsetzung im Demonstrator dient. Modelle dienen dabei der strukturierten Abstraktion des geplanten Systems und seiner Teilfunktionen, indem sie die untersuchungsrelevanten Eigenschaften innerhalb eines durch das Untersuchungsziel definierten Toleranzrahmens beschränken [VDI14, S. 3]. Der Detaillierungsgrad der Modelle richtet sich nach dem Verwendungszweck und ist aufgabenspezifisch

festzulegen. Durch die gezielte Abstraktion wird Wesentliches von Unwesentlichem getrennt und somit eine systematische Umsetzung im Demonstrator ermöglicht [PONN11, S. 10]. Im Folgenden werden die Modellierung der Nutzeradaptivität (Kapitel 5.1) sowie die generische Modellierung der Montageanweisungen und die Ableitung einer standardisierten Syntax im Hinblick auf die automatische Generierung von Montageanweisungen (Kapitel 5.2) beschrieben.

5.1 Modellierung Nutzeradaptivität

In diesem Kapitel wird das Konzept zur Nutzeradaptivität des KAS modelliert und die schrittweise Anpassung der Informationsbereitstellung an das Kompetenzniveau des Werkers vorgestellt.

5.1.1 Ansatz zur kompetenzgerechten und nutzeradaptiven Unterstützung

Die steigende Komplexität in der manuellen Mehrproduktmontage stellt neue Anforderungen an Werker, da die Arbeitsumgebung durch eine hohe Informationsdichte geprägt ist, die sowohl quantitativ als auch qualitativ anspruchsvoller wird. Dies führt zu einer erhöhten psychischen Belastung und Beanspruchung der Werker. [BORN18, S. 266] Die zunehmend heterogene Zusammensetzung der Belegschaft vieler produzierender Unternehmen – bestehend aus Mitarbeitern unterschiedlicher Nationalitäten, Altersgruppen und Vorbildungen sowie wechselnden Arbeitskräften wie Aushilfen oder Leiharbeitern – verstärkt diese Herausforderungen zusätzlich [RADO99, S. 49; TEUB16, S. 350].

Einen Lösungsansatz für die beschriebene Problemstellung stellen nutzeradaptive KAS dar, die, wie in Abbildung 5-1 dargestellt, im Spannungsfeld zwischen Rahmenbedingungen, Arbeitsplatzanforderungen und den persönlichen Ressourcen der betroffenen Werker gezielt unterstützen, um die Beanspruchung zu reduzieren.

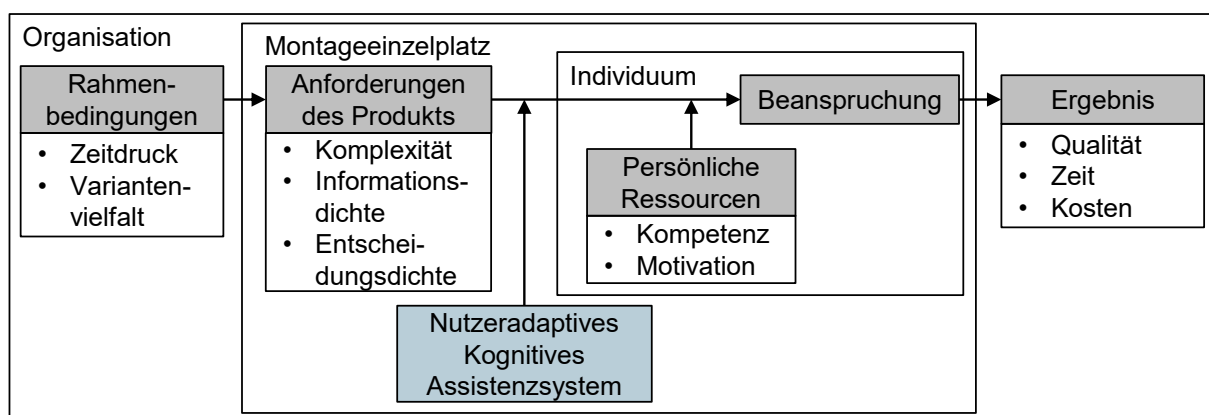


Abbildung 5-1: Nutzeradaptives KAS im Kontext der Montage (eigene Darstellung in Anlehnung an BORN18, S. 266)

Nutzeradaptive Assistenzsysteme erkennen Veränderungen im Arbeitsumfeld sowie im Kompetenzniveau der Werker und passen die bereitgestellten Informationen

dynamisch an [KOEL15b, S. 2]. Dadurch tragen sie zur Optimierung des Zieldreiecks der Produktion bei, indem sie Qualität, Zeit und Kosten positiv beeinflussen [BORN18, S. 266].

Ein zentraler Aspekt ist die Balance zwischen externen Anforderungen und internen Ressourcen. Hohe Informationsanforderungen, die die kognitiven Kapazitäten der Werker übersteigen, können durch technische Unterstützung kompensiert werden. Nutzeradaptive Assistenzsysteme stellen situativ angepasste Informationen bereit, die die individuellen Kompetenzen und Beanspruchungen der Werker berücksichtigen [REIN13, S. 545; MUEL14, S. 559]. Sie erkennen Über- und Unterbeanspruchungen während des Prozesses und leiten automatisch Gegenmaßnahmen ein [BORN18, S. 267]. Anstelle einer „one-size-fits-all“-Lösung ermöglichen nutzeradaptive Systeme eine individuelle Unterstützung, die sich an den Fähigkeiten und aktuellen Bedürfnissen der Nutzer orientiert [KERB15, S. 28]. Dies ist insbesondere in der Mehrproduktmontage relevant, in der eine steigende Produkt- und Variantenvielfalt die Anforderungen weiter erhöht. Ziel ist es, dass die Werker die Montagevorgabezeiten langfristig erreichen, indem situative Unsicherheiten reduziert und Überforderungen vermieden werden, ohne dabei Unterforderung zu erzeugen und die Leistung negativ zu beeinflussen [DOLL14, S. 344]. Nutzeradaptive KAS steigern nicht nur die Produktivität und reduzieren die Arbeitsbelastung nachhaltig, sondern können auch die Wandlungsfähigkeit des gesamten Montagesystems erhöhen, in das sie integriert sind. Das KAS kann innerhalb eines „vorgedachten Lösungsraums“ flexibel auf wechselnde Werker reagieren und eine optimale Unterstützung unter Berücksichtigung individueller Bedürfnisse und Fähigkeiten bieten.

Zur Umsetzung eines nutzeradaptiven KAS bedarf es einer kompetenzgerechten Anpassung der Art und Tiefe der Montageanweisungen. Der in Abbildung 5-2 dargestellte Zusammenhang, angelehnt an DANDER, dient dabei als Grundlage. Durch die wiederholte Ausführung der Montageaufgabe verändert sich das wahrgenommene Anforderungsniveau des Werkers im Rahmen eines Lernprozesses [DAND21, S. 48]. Dabei findet eine aufgabenbezogene Kompetenzentwicklung statt, die mit unterschiedlichen Unterstützungsbedarfen in Bezug auf Art und Tiefe der Montageanweisungen einhergeht.

Eine statische Informationsbereitstellung kann bereits nach wenigen Wiederholungen und gestiegener Kompetenz zur Unterforderung und Langweile führen, was sich negativ auf Aufmerksamkeit und Motivation auswirken kann [FUNK15a, S. 1270; ADLE19, S. 25]. Während eine zu geringe Unterstützung die Fehlerquote erhöhen und Stress auslösen kann, wird eine zu umfangreiche Unterstützung oft als bevormundend empfunden, was die Akzeptanz für das KAS mindert und langfristig die Produktivität senken kann [SEHR21, S. 1]. Daher ist ein dynamischer Ansatz erforderlich, der Art und Tiefe der Montageanweisungen flexibel an das individuelle Kompetenz- und Anforderungsniveau anpasst [DAND21, S. 49; HINR21, S. 93].

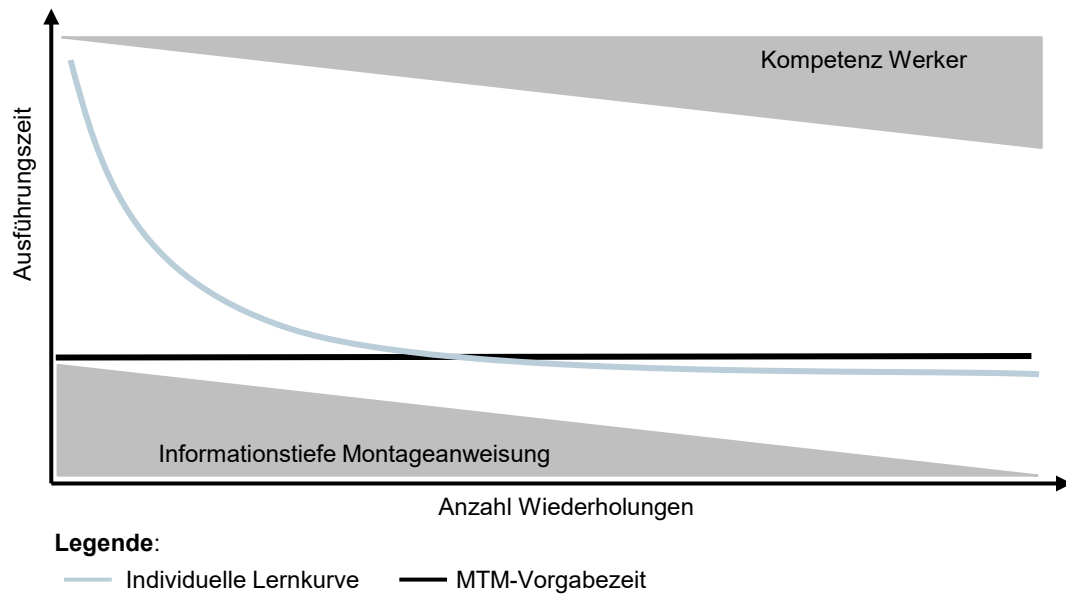


Abbildung 5-2: Ansatz zur Nutzeradaptivität durch kompetenzgerechte und lernkurvenbasierte Anpassung der Art und Tiefe von Montageanweisungen (eigene Darstellung in Anlehnung an DAND21, S. 51)

Um eine dynamische und kompetenzgerechte Bereitstellung von Montageanweisungen zu gewährleisten, sind Informationen über die individuellen und prozessbezogenen Kompetenzen des jeweiligen Werkers erforderlich. Hierzu eignet sich ein stufenbasiertes Kompetenzmodell, das eine schrittweise Anpassung der bereitgestellten Informationen ermöglicht [ADLE19, S. 25; DAND21, S. 48; KELM24, S. 3]. Das nutzeradaptive KAS kann beispielsweise beim Erreichen einer höheren Kompetenzstufe bestimmte Informationen gezielt reduzieren oder vereinfachen. So kann die Unterstützung an den spezifischen Bedarf des Werkers angepasst werden, indem ausschließlich relevante Inhalte im passenden Detailgrad zur Verfügung gestellt werden [FRAN09, S. 824]. Dies kann durch Montageanweisungen mit unterschiedlicher Granularität und skalierbarer Informationstiefe erfolgen [LANG07, S. 116]. Ein solcher Ansatz ermöglicht es, sowohl die Anzahl der Anweisungen als auch deren Detailgrad individuell anzupassen [PETZ20b, S. 96].

5.1.2 Informationsbereitstellungsarten

Im Verlauf des Kompetenzerwerbs benötigen Werker je nach Kompetenzstufe Montageanweisungen mit unterschiedlich detaillierten Informationen. Als besonders effizient erweist sich hierzu die Nutzung des visuellen Kanals (vgl. Kapitel 2.4.2). Um eine optimale Unterstützung zu gewährleisten, ist es wichtig, geeignete Kombinationen von Informationsbereitstellungsarten für die verschiedenen Kompetenzstufen zu identifizieren.

Vor diesem Hintergrund werden in dieser Dissertation die gängigsten und dem Stand der Technik entsprechenden Formen der Informationsbereitstellung näher betrachtet, die sowohl über Bildschirme, Pick-by-Light-Anzeigen als auch über Projektoren In-situ

bereitgestellt werden können. Diese Formen umfassen Animationen, Bilder, Textanweisungen sowie die Projektion beliebiger Konturen und Zeichen. In Tabelle 5-1 sind die verschiedenen Arten der Informationsbereitstellung aufgeführt und anhand relevanter Kriterien wie Informationstiefe, Direktheit der Handlungsunterstützung, kognitiver Aufwand und Abstraktionsgrad bewertet. Die Einordnung basiert auf einer qualitativen Bewertung der Informationsarten auf einer dreistufigen Skala (niedrig, mittel, hoch), gestützt auf Literatur und eigene Voruntersuchungen. Die Bewertung gibt Aufschluss über die Eignung der jeweiligen Informationsart in Bezug auf die verschiedenen Phasen des Kompetenzerwerbs.

Tabelle 5-1: Übersicht und Bewertung Informationsbereitstellungsarten (eigene Darstellung in Anlehnung an BASH23, S. 87)

Informationsart	Informations-tiefe	Direktheit Handlungsunterstützung	Kognitiver Aufwand	Abstraktionsgrad
Animation/Video (Fügevorgang)	Hoch	Hoch	Mittel	Niedrig
Bild (Fügevorgang)	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel
Textanweisung (Fügevorgang)	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
Laserprojektion (In-situ)	Mittel	Hoch	Niedrig	Niedrig
Textanweisung (Entnahme)	Niedrig	Mittel	Hoch	Hoch
Pick-by-Light (Entnahme)	Niedrig	Hoch	Niedrig	Niedrig

JESKE ET AL. weisen in Experimenten nach, dass die Erstaussführungsdauer einer Montageaufgabe mit abnehmendem Abstraktionsgrad bzw. zunehmender Informationstiefe sinkt. Gleichzeitig hängt der Lernfortschritt in hohem Maße von der Art der Informationsdarstellung ab. Während text- und bildbasierte Montageanweisungen zu einer Reduzierung der Fehleranzahl führen, steigt die Fehlerquote bei animationsbasierten Anweisungen nach mehreren Wiederholungen wieder an. Dies wird auf eine fehlgeleitete Salienz zurückgeführt, bei der eine übermäßig auffällige Gestaltung von Animationen bzw. Montageanweisungen dazu führt, dass sie mit zunehmender Ausführung der Aufgabe entweder ignoriert oder als ablenkend wahrgenommen wird. [JESK14]

Experimente von HOLD zeigen zudem, dass die höchsten Lerneffekte erzielt werden, wenn Bild- und Textinformationen gekoppelt präsentiert werden [HOLD20, S. 108]. Diese sogenannte „Doppelcodierung“ ermöglicht eine schnelle Informationsverarbeitung mit geringer kognitiver Belastung [RADO99, S. 68]. Animationen sind intuitiv

verständlich und hilfreich bei der Darstellung dynamischer Prozesse. Statische Darstellungen (Bilder) erfordern hingegen eine „mentale Animation“, d.h. Schlussfolgerungen über die Dynamik zwischen einzelnen Bildern (Relation Füge­teil zu Montageobjekt), was den Lernprozess unterstützen kann, aber kognitiv mehr Kapazitäten bindet [WATS10, S. 85]. Dies verdeutlicht, dass komplexere Darstellungen wie Animationen in frühen Phasen hilfreich sind, während erfahrene Werker mehr von kompakten Text- oder Bildhinweisen und Laserprojektionen profitieren können.

Die dargestellten Erkenntnisse zur Wirkung verschiedener Informationsformen auf den Lernfortschritt bilden die konzeptionelle Grundlage für das im Folgenden vorgestellte Kompetenzstufenmodell zur nutzeradaptiven Informationsbereitstellung.

5.1.3 Kompetenzstufenmodell zur Nutzeradaptivität

Kompetenzen sind wissensbasiert und entwickeln sich durch Lernen und praktische Erfahrung, wobei die Kompetenzentwicklung typischerweise in mehreren Stufen oder Phasen verläuft [SCHL18, S. 115]. In Anlehnung an BREITKOPF und TEUBNER wird daher ein vierstufiges Kompetenzstufenmodell eingeführt, das auf dem in der Industrie bewährten ILUO-Modell basiert [BREI18, S. 77; TEUB21, S. 103].

Die Grundidee dieses Kompetenzstufenmodells zur Nutzeradaptivität besteht darin, die Informationstiefe schrittweise an das Kompetenzniveau der Werker anzupassen. Anfänger erhalten detaillierte Anweisungen und ergänzende Inhalte, um den Lernprozess zu unterstützen. Mit zunehmender Erfahrung wird die Informationstiefe reduziert, sodass fortgeschrittenen Werkern nur noch wesentliche Informationen angezeigt werden, um den Arbeitsfluss nicht zu stören. [HINR17, S. 1573; MUEL18, S. 145]

Für die Festlegung der Stufenwechsel sind Schwellwerte erforderlich, die auf der individuellen Beanspruchung des Werkers basieren. Methoden wie die Messung der Herzfrequenz, Herzratenvariabilität, Pupillengröße oder die Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Haut (elektrodermale Aktivität) könnten theoretisch zur Bestimmung der Beanspruchung während der Montageoperation eingesetzt werden [HASL18, S. 53]. In der Praxis stoßen derartige Verfahren – trotz ihrer Sensitivität – häufig auf geringe Akzeptanz, da sie als invasiv, störanfällig oder unpraktikabel wahrgenommen werden, insbesondere im realen Arbeitsumfeld [BLAE22, S. 22].

In der Literatur werden daher alternative Konzepte vorgeschlagen, die in den meisten Fällen die Ausführungszeit und die Fehlerhistorie als Indikatoren für den Wechsel in eine höhere Kompetenzstufe verwenden (vgl. Kapitel 3.1). Dieser Ansatz wird auch in der vorliegenden Dissertation verwendet, da er sich, wie in der Literaturrecherche aufgezeigt, als praktikabel und anwenderfreundlich erwiesen hat.

Hinsichtlich der Bestimmung der Ausführungszeit ist eine Bezugsleistung erforderlich. Die Bezugsleistung beschreibt eine vorgegebene Leistung bzw. eine Sollvorgabezeit, die im Zusammenhang mit der Arbeitsaufgabe und den entsprechenden Qualitätsanforderungen steht. Für die Ausführungszeit wird die MTM-Vorgabezeit t_{MTM} für die

jeweilige Montageaufgabe, die sich aus mehreren Montageprozessen bzw. -operationen zusammensetzt, herangezogen. Basierend auf den Voruntersuchungen von HOLD zu Informationsverarbeitungs- und -interpretationszeiten werden in den Kompetenzstufen I und L praxisgerechte Zuschläge für die Betrachtungszeit der Montageanweisungen in die Vorgabezeit integriert. In Stufe I beträgt der Zuschlag 9,18 Sekunden pro Prozess, bestehend aus 4,32 Sekunden für die Erfassung eines Bildes oder einer Animation und 4,86 Sekunden für das Lesen eines Textsatzes. In Stufe L wird nur noch die Hälfte dieses Zuschlags, also 4,59 Sekunden, berücksichtigt, da die Betrachtung von Bild und Text nach mehrfacher Wiederholung erfahrungsgemäß reduziert ist. [HOLD20, S. 96] Montagefehler werden sanktioniert, indem sie durch das KAS angezeigt und vom Werker behoben werden müssen, was zu einer längeren Bearbeitungszeit für den betroffenen Durchgang führt.

Für die Berechnung der Schwellwerte wird der gleitende Mittelwert (GMW) der Zeit für die letzten drei Durchgänge t_{GMW} verwendet. Dies erhöht die Robustheit der Schwellwertberechnung, da Verzerrungen ausgeglichen werden, die beispielsweise durch zufällig schnelle Montageprozesse entstehen können – etwa wenn ein Fügeprozess, bei dem die Teile üblicherweise leicht verhaken, durch günstige Umstände sofort gelingt, ohne dass eine Korrektur erforderlich ist. Ebenso werden unglückliche oder nicht selbst verschuldete Fehler, wie z. B. ein kurzes Klemmen einer Montagehilfe berücksichtigt.

Ab Kompetenzstufe L gilt, steigt der GMW der letzten drei Durchgänge über den Schwellwert zur Erreichung der aktuellen Stufe, wird eine Rückstufung vorgeschlagen, da dies auf eine mögliche Überforderung hinweist und eine angemessenere Unterstützung erforderlich macht. Das in KELM ET AL. entwickelte Kompetenzstufenmodell, das auf den Schwellwerten von KÖLZ ET AL. basiert, ist in Abbildung 5-3 dargestellt [KELM24; KOEL15b].

Kompetenzstufe	Schwellwert zu Erreichung der Kompetenzstufe	Aufnehmen		Platzieren				Warnung/Hinweis	Aufgabe KAS
		Text	Pick-by-Light	Animation	Bild	Text	Laserkontur		
I	Neues Produkt/Variante oder Produkt >1 Monat nicht mehr montiert	✓	✓	✓		✓	✓	✓	Tutoriell
L	$t_{GMW} < 1,5 * t_{MTM}$ und mindestens 3 Durchgänge in Stufe I		✓		✓	✓	✓	✓	Festigung Lernprozess
U	$t_{GMW} < 1,2 * t_{MTM}$ und mindestens 2 Durchgänge in Stufe L		✓				✓	☒	Aufbau Routine
O	$t_{GMW} < 1,1 * t_{MTM}$ und mindestens 2 Durchgänge in Stufe U							☒	Stiller Begleiter

✓ = Standard

☒ = Fehlerhistorienabhängig

t_{GMW} = gleitender Mittelwert der letzten drei Montagedurchgänge

t_{MTM} = MTM-Vorgabezeit Montagedurchgang

Abbildung 5-3: Nutzeradaptives Informationsbereitstellungsmodell zur kompetenzgerechten Anpassung der Art und Tiefe von Montageanweisungen [KELM24, S. 4]

Der Montageprozess wird in Anlehnung an MTM-2 in die Montageoperationen Aufnehmen (Entnahmeoperation) und Platzieren (Fügeoperation) unterteilt (eine detaillierte Beschreibung hierzu folgt in Kapitel 5.2.1), um die Montageanweisungen insbesondere in der ersten Kompetenzstufe zu präzisieren.

Kompetenzstufe I (Anfänger)

In der Kompetenzstufe I übernimmt das nutzeradaptive KAS eine tutorielle Rolle und unterstützt den Werker intensiv nach dem Prinzip „Training on the Job“. Dabei werden ihm folgende Informationsarten kombiniert zur Verfügung gestellt:

- eine Animation des Fügevorgangs
- Textanweisungen für Füge- und Entnahmeoperationen
- projizierte Laserkonturen
- ein Pick-by-Light-Signal zur Markierung der Entnahmestelle
- sowie Warnhinweise.

Mit zunehmender Routine nimmt sowohl die wahrgenommene Komplexität der Montage als auch der Unterstützungsbedarf ab. Regelmäßige Produktneueinführungen oder Variantenwechsel können diesen Effekt jedoch aufheben oder sogar umkehren, da der häufige Wechsel zwischen Produktvarianten die Lernkurve des Werkers unterbricht oder zu einem vorzeitigen Abbruch führen kann. [WIES14, S. 2; BORN18, S. 273] Aus diesem Grund werden alle Werker, die ein Produkt oder eine Variante entweder noch nie oder seit mehr als einem Monat nicht mehr montiert haben, der Kompetenzstufe I zugeordnet. Eine längere Unterbrechung des Prozesses beeinflusst den Wissensstand des Werkers. Untersuchungen von DENKENA ET AL. zu Vergessenskurven in der Produktion zeigen, dass bei Unterbrechungen von weniger als einem Tag kein Vergessen stattfindet. Nach einer Unterbrechung von mehr als einem Monat sind jedoch bereits 15 - 30 % der erlernten Prozessschritte nicht mehr abrufbar. [DENK16, S. 491]

Sinkt der GMW der letzten drei Durchgänge unter das 1,5-fache der MTM-Vorgabezeit [KOEL15b] und hat der Werker die Montageaufgabe mindestens dreimal erfolgreich ausgeführt, erreicht er die nächste Kompetenzstufe.

Kompetenzstufe L (Könner)

Für das Erlernen einer neuen Arbeitsaufgabe ist eine hohe Informationstiefe der Montageanweisungen sinnvoll. Nach einer gewissen Zeit kann eine gleichbleibend detaillierte Informationsdarstellung jedoch den Arbeitsfluss behindern [ADLE19, S. 28]. Insbesondere eine dauerhafte Bereitstellung von Videos oder Animationen wirkt bei fortgeschrittener Arbeitserfahrung störend und belastend [BAEC18, S. 39]. Zu viele Informationen können nicht nur zu Frustration führen, sondern auch den Werker durch Überforderung behindern [SYBE16, S. 347]. Daher erfolgt die Unterstützung ab dieser Kompetenzstufe durch Bilder anstelle von Animationen sowie durch Textanweisungen und Projektionen von Laserkonturen des Fügevorgangs.

Zudem wird die Entnahmeoperation nicht mehr durch eine Textanweisung kommuniziert, sondern ausschließlich durch ein Pick-by-Light-System angezeigt. Diese Reduktion der Informationstiefe unterstützt einen flüssigen Arbeitsablauf, da unnötige kognitive Belastungen vermieden werden. Das KAS soll so in dieser Stufe zu einer Festigung des Lernprozesses führen. Sinkt der GMW der letzten drei Durchgänge unter das 1,2-fache der MTM-Vorgabezeit [KOEL15b] und wurde die Montageaufgabe in dieser Stufe mindestens zweimal wiederholt, erreicht der Werker die nächste Kompetenzstufe.

Kompetenzstufe U (Fortgeschrittener)

In der Kompetenzstufe U wird davon ausgegangen, dass weder die Textanweisungen noch die Bilder für den Fügevorgang länger betrachtet werden, da Menschen mit mehr Erfahrung dazu neigen, auffällige Details zu übersehen, insbesondere wenn die Informationen aufgrund zu hoher Salienz als unwichtig eingestuft werden [WOLF19, S. 7]. Daher werden an dieser Stelle nur noch Laserkonturen auf das Basisfügeteil projiziert, um die Fügeoperationen hervorzuheben, während das Pick-by-Light-System weiterhin die Entnahmestelle signalisiert. Auf diese Weise soll eine Routine für die jeweilige Montageaufgabe aufgebaut werden.

Zusätzlich erfolgt in Abhängigkeit von der individuellen Fehlerhistorie eine Unterstützung in Form einer Warnung bzw. eines Hinweises für Prozesse, bei denen in den letzten drei Durchgängen Fehler aufgetreten sind. Diese gezielte und individuelle Unterstützung verhindert, dass sich wiederkehrende Fehler festsetzen, ohne den Arbeitsfluss zu stören.

Sobald der GMW der Ausführungszeit der letzten drei Durchgänge das 1,1-fache der MTM-Vorgabezeit unterschreitet [KOEL15b] und die Montageaufgabe in dieser Stufe mindestens zweimal durchgeführt wurde, wird der Werker in die nächste Kompetenzstufe hochgestuft.

Kompetenzstufe O (Experte)

In der Kompetenzstufe O wird davon ausgegangen, dass Montageanweisungen aufgrund der engen Vorgabezeiten nicht mehr aktiv beachtet bzw. benötigt werden. Hierfür stellt das Informationsbereitstellungsmodell einen „Expertenmodus“ zur Verfügung, der den Workflow unterstützt, ohne ihn zu unterbrechen. Dies ist wichtig, um erfahrene Werker nicht in ihrem Arbeitsfluss einzuschränken und gleichzeitig die Akzeptanz des Assistenzsystems zu steigern [RUSC21, S. 194].

Obwohl die Anweisungen nicht mehr explizit angezeigt werden, kann und soll das nutzeradaptive KAS die manuellen Prozesse als stiller Begleiter prüfen und auf Montagefehler hinweisen. Diese Aufgabe muss unabhängig von der Kompetenzstufe weiterhin durchgeführt werden [MUEL18, S. 145].

Das entwickelte Kompetenzstufenmodell zur Nutzeradaptivität ist auf eine Kombination aus Beamer (alternativ Bildschirm) und Laserprojektionen zugeschnitten. Die

ausschließliche Nutzung von Beamer/Bildschirm oder Laser ist im Modell nicht vorgesehen, da es auf die komplementäre Bereitstellung von In-situ-Konturen durch den Laserprojektor sowie doppelcodierte textliche und bildliche oder video-basierte Anweisungen über den Beamer/Bildschirm ausgelegt ist (vgl. Kapitel 5.1.2).

5.2 Modellierung Montageanweisung und Ableitung generische Syntax

Für die teilautomatisierte Generierung von Montageanweisungen in unterschiedlichen Kompetenzstufen ist es notwendig, die wesentlichen Informationselemente einer Montageanweisung sowie deren Zusammensetzung zu identifizieren und in einem generischen Modell zu strukturieren. Der Fokus liegt dabei auf der Textanweisung als einzelner Bestandteil der Montageanweisung. Textanweisungen ergänzen Bilder bzw. Animationen durch zusätzliche Details oder Erklärungen und verbessern so die Lernerfahrung [CROM23, S. 1195]. Außerdem sind sie einfacher zu aktualisieren als Bilder und Animationen und somit schneller anzupassen.

In diesem Kapitel wird daher eine generische und einheitliche Syntax entwickelt, die standardisierte Bausteine für Textanweisungen definiert. Diese können flexibel modifiziert und im Sinne der Universalität an unterschiedliche Produkte oder Produktvarianten bzw. deren Montageprozesse angepasst werden, wodurch der Erstellungsaufwand minimiert und die Fehleranfälligkeit reduziert wird.

Durch die Entwicklung standardisierter und modularer Syntaxbausteine können alle relevanten Produkt-, Prozess- und Umgebungsparameter einheitlich erfasst und in eine generische Syntax überführt werden. Diese Struktur ermöglicht nicht nur eine effiziente Wiederverwendung ähnlicher Merkmale von Produkten und Prozessen, sondern stellt auch eine grundlegende Voraussetzung für die automatisierte Generierung von Montageanweisungen aus vorhandenen Auftrags- und Erzeugnisdaten dar.

5.2.1 Generische Modellierung von Textanweisungen

Für die generische Modellierung montageanweisungsrelevanter Zusammenhänge sind die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel zu berücksichtigen, da sie die zentralen Elemente der Montage darstellen (vgl. Kapitel 2.1.1) [MUEL21, S. 732]. Diese Elemente sind zunächst in Beziehung zu den grundlegenden Informationselementen zu setzen, die nach RADOW für eine sichere Durchführung manueller Montageoperationen in Montageanweisungen enthalten sein müssen. Diese Informationselemente umfassen:

- zu montierende Bauteile
- erforderliche Werkzeuge
- Vorrichtungen
- Verbindungselemente

- Sicherheits- und Warnhinweise
- auszuführende Tätigkeiten
- Mengen- und Häufigkeitsangaben. [RADO99, S. 21]

Ausgehend von diesen zentralen Informationselementen werden drei Kategorien von Informationsobjekten abgeleitet, die die Struktur des generischen Modells für montageanweisungsrelevante Zusammenhänge bilden und jeweils relevante Informationen für die Erstellung von Montageanweisungen repräsentieren: Kerninformationsobjekte, Zusatzinformationsobjekte und Prozessinformationsobjekte. Die Kerninformationsobjekte bilden die Grundlage der Montage und definieren die strukturelle Basis der Montageanweisung. Die Zusatzinformationsobjekte erweitern die Kerninformationsobjekte, indem sie diese auf einer detaillierteren Ebene beschreiben und in ihre spezifischen Komponenten aufgliedern. Die Prozessinformationsobjekte enthalten spezifische Informationen, die für die vollständige und sichere Ausführung der Montageanweisungen erforderlich sind. Das generische Modell montageanweisungsrelevanter Zusammenhänge umfasst drei Teilmodelle, die im Anschluss zu einem ganzheitlichen Modell synthetisiert werden.

Teilmodell Produkt

Ausgangspunkt für die Modellierung ist das Produkt. Ein Produkt ist in der Regel modular aufgebaut. Es besteht, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, aus Modulen, die sich aus Baugruppen zusammensetzen, welche wiederum verschiedene Bauteile bzw. Komponenten beinhalten. Die Bauteile werden häufig mit Verbindungselementen wie Schrauben, Nieten oder Klebstoffen verbunden. [MUEL21, S. 729]

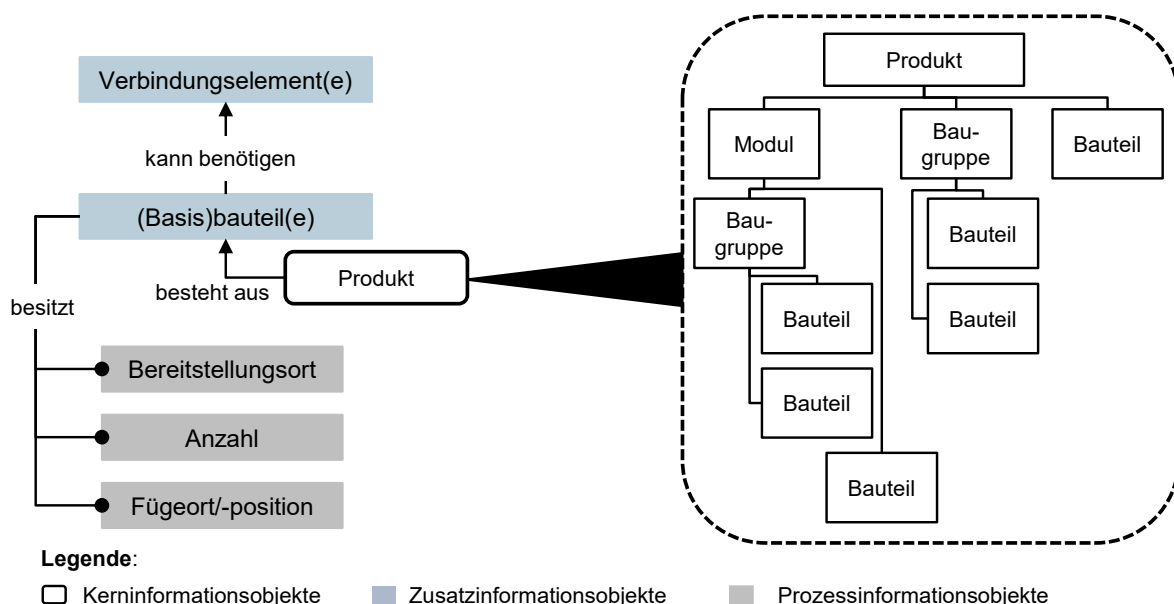


Abbildung 5-4: Teilmodell Produkt

Da Bauteile an unterschiedlichen Stellen bereitgestellt werden, ist der Bereitstellungs-ort ein zentrales Prozessinformationsobjekt. Ebenso entscheidend für den Werker ist die Anzahl der Bauteile, die pro Montageschritt entnommen werden müssen [BASH23, S. 89]. Zusätzlich sind Prozessinformationen über die genaue Positionierung und Ausrichtung der zu fügenden Bauteile von Bedeutung, weshalb sowohl der Fügeort als auch die Fügeposition im Modell abgebildet werden. Um die Produktstruktur produktneutral zu modellieren, wird jedes Bauteil hinsichtlich des Fügeorts bzw. der Fügeposition immer relativ zu einem Basisfügeteil oder einer Vorrichtung betrachtet. Das sogenannte Basisbauteil fungiert in diesem Zusammenhang als Montageobjekt, welches das hinzukommende Bauteil aufnimmt und somit den Fügeort darstellt. Alternativ kann auch eine Vorrichtung als Aufnahmeeinheit für das Bauteil fungieren – beispielsweise beim Einlegen einer Grundplatte in einen Werkstückträger oder eine andere Vorrichtung. Die Fügeposition ist wiederum die exakte Position im Basisbauteil oder in der Vorrichtung, an die das Bauteil für die Fügeoperation gebracht werden muss. [KELM25a]

Teilmodell Prozess

Das Produkt entsteht durch den Montageprozess. Das Kerninformationsobjekt Prozess besteht in Anlehnung an MTM-2 (vgl. Kapitel 2.2.2), wie in Abbildung 5-5 dargestellt, aus den Zusatzinformationsobjekten Aufnehmen und Platzieren. Dabei werden die MTM-Grundbewegungen Hinlangen, Greifen und Loslassen zu Aufnehmen und Bringen und Fügen zu Platzieren zusammengefasst. [BOKR12, S. 100] Das Bringen beschreibt dabei die Bewegung der Fügekomponente bzw. des Bauteils in den unmittelbaren Nahbereich des Fügevorgangs. Fügen ist in diesem Zusammenhang als Oberbegriff für alle Tätigkeiten zu verstehen, die das dauerhafte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff ermöglichen (vgl. Kapitel 2.1.2) [DIN03]. Dazu gehört auch das Halten, also das vorübergehende Fixieren einer Komponente in einer bestimmten Orientierung und Position während des Bringens und Fügens [VDI90].

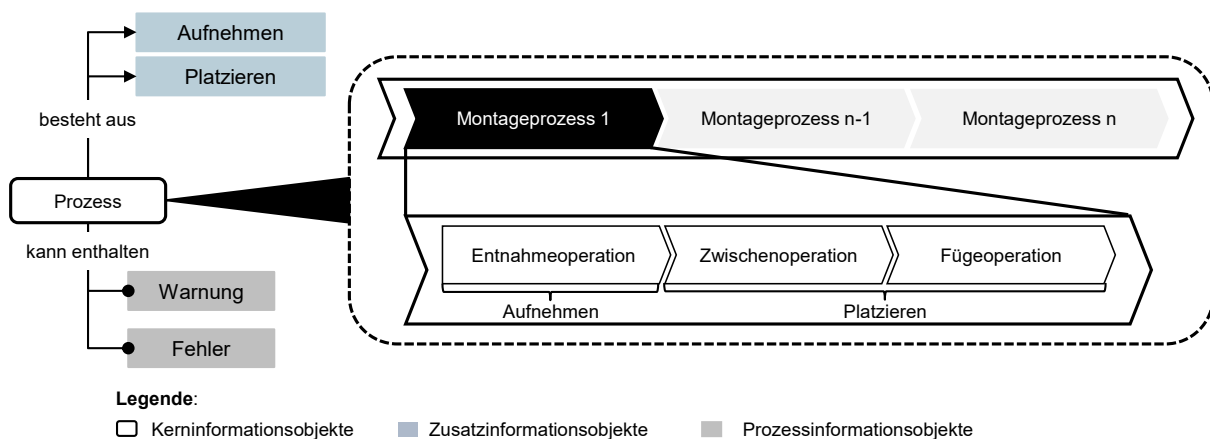


Abbildung 5-5: Teilmodell Prozess

Der Montageprozess wird außerdem im Hinblick auf die Montageanweisungserstellung und die kompetenzgerechte Informationsbereitstellung in zwei wesentliche Ebenen gegliedert und verstanden. Die oberste Ebene umfasst die verschiedenen Montageprozesse, die in einer bestimmten Sequenz durchgeführt werden, um ein Produkt, Modul oder eine Baugruppe zu montieren. Diese lassen sich den Prozessen mit zweistelligen Ordnungsnummern (ON) der DIN-Norm 5893 Teil 1 bis Teil 8 (z. B. DIN 5893-1 „4.1 Zusammensetzen“ oder DIN 5893-8 „4.8 Kleben“) und der Ebene der „Teilfunktionen“ in VDI-Richtlinie 2860 (z. B. „Sichern“) zuordnen.

Die einzelnen Montageprozesse setzen sich, wie in Abbildung 5-5 zu sehen, aus mehreren Montageoperationen zusammen, die als Teilfunktionen des Montageprozesses zu verstehen sind [MART09, S. 272]. Die Montageoperationen sind den dreistelligen ON der DIN-Norm 8593 Teil 1 bis Teil 8 (z. B. „4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten“ oder „4.8.1.1 Nasskleben“) und der Ebene der Elementar- bzw. zusammengesetzten Funktionen der VDI-Richtlinie 2860 (z. B. „Spannen“) zugeordnet.

Der Montageprozess beginnt mit dem Aufnehmen des Bauteils, des Verbindungselements oder des Werkzeugs- bzw. der Vorrichtung. Aus diesem Grund wird eine Entnahmeoperation eingeführt, die dem Aufnehmen nach MTM-2 entspricht (vgl. Kapitel 2.2.2).

- Entnahmeoperation: Diese Operation umfasst die Entnahme der benötigten Bauteile und/oder Werkzeuge an ihrem Bereitstellungsort.

Anschließend erfolgt das Platzieren. Hierbei wird zwischen Zwischenoperationen und der eigentlichen Fügeoperation unterschieden. Bei den Zwischenoperationen handelt es sich in der Regel um das Auflegen, Einlegen oder Ineinanderschieben. Die Fügeoperation und die Zwischenoperation entsprechen dem Platzieren nach MTM-2 (vgl. Kapitel 2.2.2). Es ergeben sich kombinatorische Möglichkeiten von Zwischenoperationen und Fügeoperationen.

- Zwischenoperation: Diese Operation ist nicht immer notwendig und wird nur dann ausgeführt, wenn ein zusätzlicher Schritt erforderlich ist, bevor die eigentliche Fügeoperation stattfinden kann. Ein Beispiel ist das Einfädeln einer Schraube in ein Gewinde, bevor sie festgezogen wird. Diese Operation entspricht im Wesentlichen einer Fügeoperation, ist aber ein vorbereitender Schritt.
- Fügeoperation: Diese Operation umfasst das eigentliche Verbinden der Bauteile.

Die Montageprozesse können im Modell zusätzlich spezifische Prozessinformationsobjekte enthalten. Dazu gehören präventive Warnungen, die prozessabhängig auf besondere Risiken oder kritische Aspekte hinweisen. Darüber hinaus weist jeder Prozess charakteristische Fehlerpotenziale auf, die im Modell durch entsprechende Fehlermeldungen berücksichtigt werden. Eine detaillierte Beschreibung von Warnungen und Fehlermeldungen erfolgt in Kapitel 5.2.3

Teilmodell Betriebsmittel

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 dargelegt, kann die Ausführung von Montageprozessen nach dem Grad des menschlichen Eingriffs bzw. dem Grad der Mechanisierung klassifiziert werden. Dieser wird durch den Einsatz von Betriebsmitteln bestimmt, die neben dem Montageprozess und dem Produkt ein wichtiges Kerninformationsobjekt im Hinblick auf die generische Modellierung montageanweisungsrelevanter Informationen darstellen.

Betriebsmittel werden im Rahmen der Modellierung und in Anlehnung an LUŠIĆ in Werkzeuge, Vorrichtungen und Mess-/Prüfmittel unterteilt [LUŠI17, S. 68]. Mess- und Prüfmittel werden im Rahmen des Kontrollierens als Teilfunktion des Handhabens eingesetzt [VDI90, S. 4]. Eine klare Abgrenzung zwischen Werkzeug und Vorrichtung ist jedoch nicht immer möglich. So kann z. B. eine Fügevorrichtung sowohl das Halten der Bauteile als auch die Funktion eines Werkzeuges übernehmen, wenn sie die Bauteile durch Einpressen mit einem integrierten Stempel fügt. Grundsätzlich dienen Vorrichtungen vorwiegend dem Spannen bzw. Halten von Werkstücken, während Werkzeuge zur Durchführung von Fügeprozessen eingesetzt werden. [LUŠI17, S. 68]

Abhängig von den eingesetzten Werkzeugen, Mess- oder Prüfmitteln können mit diesen Zielparameter wie z. B. ein Drehmoment, eine Temperatur oder eine bestimmte Kraft erreicht bzw. gemessen werden. Die Zielparameter werden im entwickelten Modell, wie in Abbildung 5-6 dargestellt, den Prozessinformationsobjekten zugeordnet. [WIES14, S. 86; LUŠI17, S. 70; BASH23, S. 89]

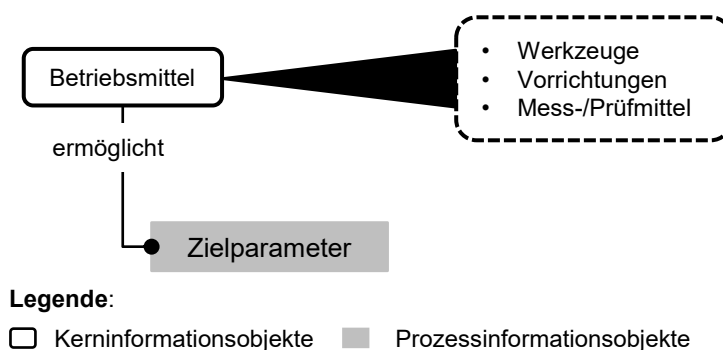


Abbildung 5-6: Teilmodell Betriebsmittel

Werkzeuge und Vorrichtungen können unterschiedlich stark an der Wertschöpfung des manuellen Montageprozesses beteiligt sein. Dies lässt sich anhand der Unterscheidung zwischen manuellem und mechanisiertem Fügen mit Werkzeugen verdeutlichen.

Beim manuellen Fügen erfolgt die Wertschöpfung im Wesentlichen durch den Werker, der die für die Montageoperation notwendige Energie und Bewegung aufbringt. Diese Kategorie unterteilt sich weiter in:

- Ohne Betriebsmittel: Der Werker führt die Fügeoperation ausschließlich mit den Händen aus, wie etwa das Einlegen einer Feder in eine Endplatte.
- Mit einfachen Werkzeugen: Der Werker wird durch einfache Werkzeuge (z. B. Schraubendreher, Zange) unterstützt, wobei er die Energie und die Bewegung des Werkzeugs selbst aufbringt, z. B. beim Einschrauben einer Schraube mit einem einfachen handgeführten Kreuzschlitzschraubendreher.

Beim mechanisierten Fügen mit Werkzeugen erfolgt die Wertschöpfung durch das Zusammenwirken des Werkers und den mechanisierten Werkzeugen, wobei die Energie für den Fügevorgang von außen zugeführt wird. Der Werker positioniert die Bauteile und initiiert den Fügeprozess, während das Werkzeug die eigentliche Fügeoperation übernimmt. Dies kann sowohl durch handgeführte Werkzeuge als auch durch ortsgebundene Systeme erfolgen, bei denen der Werker lediglich den Prozess auslöst. Beispiele hierfür sind das Anziehen von Schrauben mit einem Akkuschrauber oder das Einpressen von Bauteilen in einer Haltevorrichtung, bei der das Werkzeug den Fügeprozess automatisch durchführt. [LUŠI17, S. 69]

Synthese Gesamtmodell

Die systematisch hergeleiteten Informationsobjekte lassen sich nun zu einem generischen Gesamtmodell der montageanweisungsrelevanten Informationen und Zusammenhänge synthetisieren, wie in Abbildung 5-7 dargestellt. Dieses Modell verdeutlicht, wie die verschiedenen Informationsobjekte miteinander verknüpft sind und auf welche Weise sie zur Beschreibung eines vollständigen Montageprozesses beitragen.

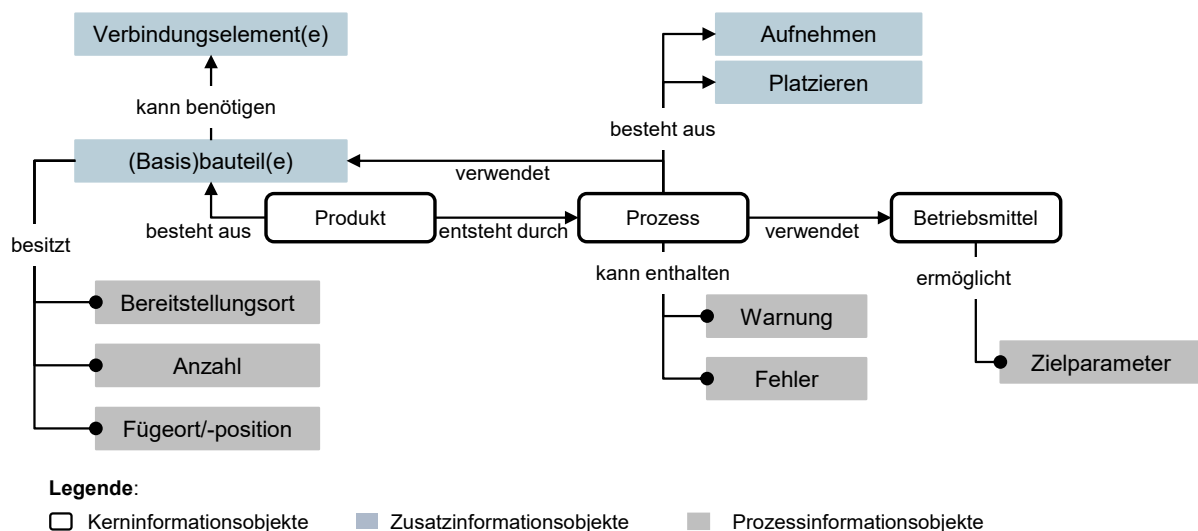


Abbildung 5-7: Generische Modellierung montageanweisungsrelevanter Zusammenhänge manueller Montageprozesse (eigene Darstellung in Anlehnung an KELM25a)

Durch die Verknüpfung der Teilmodelle entsteht ein Modell, das die automatische Generierung von Montageanweisungen unterstützt. Es bietet eine flexible, modulare Basis für die Erstellung von universellen Montageanweisungen, die sich auf unterschiedliche Kompetenzstufen skalieren lassen.

5.2.2 Ableitung einer standardisierten Syntax für Montageanweisungen

Auf Grundlage des zuvor beschriebenen generischen Modells zur Abbildung von Montageprozessen und -zusammenhängen müssen die definierten Informationsobjekte in eine bestimmte Reihenfolge gebracht werden, um auf dieser Grundlage standardisierte Syntaxbausteine für Montageanweisungen zu generieren. Hierbei gilt es, die Syntaxbausteine modular und nach standardisierten Beschreibungsmustern aufzubauen und sie kompatibel zueinander zu gestalten. Auf diese Weise sind sie universal auf verschiedenste Montageprozesse anwendbar und tragen dazu bei, die automatische Erstellung von Montageanweisungen zu beschleunigen.

Montageanweisungen sind Teil der technischen Dokumentation. Da es keine speziellen Richtlinien für die Erstellung von Montageanweisungen gibt, können die allgemeinen Gestaltungsrichtlinien für den ergonomischen Aufbau von technischen Dokumenten herangezogen und übertragen werden. [LANG07, S. 48] Montageanweisungen sollen notwendige Informationen schnell, sachgerecht und einprägsam vermitteln. Dabei sollte in Bezug auf Textanweisungen der sogenannte Sachstil verwendet werden, der sich durch eine übersichtliche Textstruktur und eine klare, knappe Ausdrucksweise in nüchterner Sprache auszeichnet. Die Texte sollten verständlich und präzise formuliert sein und eine einheitliche Terminologie verwenden [KOTH11, S. 63]. Es gilt, die korrekten Bezeichnungen für die beschriebenen Objekte und Prozesse zu identifizieren und grammatikalisch korrekt in verständliche Anweisungen zu integrieren. Dabei ist eine durchgängige und konsistente Verwendung der Bezeichnungen im gesamten Text erforderlich, um einheitliche Begriffe für gleiche Sachverhalte zu gewährleisten. [LANG07, S. 49]

Für die automatische Generierung der Montageanweisungen muss zwischen der Semantik (strategische Komponente) und der Syntax (taktische Komponente) eines Anweisungstextes unterschieden werden. Die Semantik verleiht einem Satz Sinn und Bedeutung, während die Syntax das Muster beschreibt, nach dem die Wörter angeordnet sind [LANG07, S. 50]. Die syntaktische und semantische Gestaltung der Informationen sollte dabei auf die Zielgruppe abgestimmt sein, wobei ein verständliches Niveau gewählt werden sollte, um möglichst viele Personen der Zielgruppe angemessen informieren zu können [LANG07, S. 49].

Grundlage für Montageanweisungen ist die Formulierung von Handlungsanweisungen, die als präzise und prägnante Aufforderung zur Durchführung bestimmter Tätigkeiten oder einer Abfolge von Einzeltätigkeiten zu verstehen sind. Aus syntaktischer Sicht haben sich zwei verschiedene Formen für Montageanweisungen etabliert. Zum einen gibt es den Aufforderungssatz, dessen Prädikat ein Handlungsverb im Imperativ ist (z. B. „Ziehen Sie die Schraube mit 12 Nm Drehmoment an“). Zum anderen kann der Satz aus einer Kombination eines Handlungsverbs im Infinitiv mit einem oder mehreren Objekten bestehen (z. B. „Die Schraube mit 12 Nm anziehen“). Beide Formen der Handlungsanweisung richten sich direkt an den Werker und fordern ihn auf, eine

bestimmte Handlung auszuführen. Für Montageanweisungen wird jedoch, obwohl beide Formen grundsätzlich verwendet werden können, die zweite Form bevorzugt. Diese Variante vermeidet die persönliche Anrede und ist daher sprachökonomischer und weniger aufdringlich. [LANG07, S. 50]

Weiterhin sollte auf die Verwendung von Modalverben wie „müssen“ oder „sollen“ verzichtet werden (z. B. „Sie müssen die Schraube mit 15 Nm festziehen“). Diese Formulierungen wirken zu autoritär und können negative Reaktionen beim Werker hervorrufen, wodurch die eigentliche Intention des Anweisens und Anleitens verfehlt wird. Ebenso sollte auf die Verwendung des Konjunktivs mit „man“ verzichtet werden (z. B. „Man ziehe die Schraube mit 15 Nm fest“), da diese veraltete Formulierung eher einen Empfehlungscharakter impliziert, als eine klare und direkte Anweisung zu geben. [LANG07, S. 50]

Ein weiteres sprachliches Element, das mit Bedacht verwendet werden sollte, sind Präpositionen. Sie dienen der Darstellung von Aussagebeziehungen und Verhältnissen, indem sie mit Substantiven oder Pronomen zu Präpositionalgefügen verbunden werden. Bei der Verwendung von Präpositionen ist darauf zu achten, dass der Satz nicht überfrachtet wird, da dies schnell zu Verwirrung führen kann. Die Verwendung von Aktiv- statt Passivsätzen hilft, solche komplexen Konstruktionen zu vermeiden und die Verständlichkeit der Anweisungen zu verbessern. [KOTH11, S. 144]

Basierend auf diesen Gestaltungsrichtlinien erfolgt nun die Überführung der definierten Informationsobjekte aus dem generischen Modell (vgl. Abbildung 5-7) in Syntaxbausteine, die im Zusammenspiel eine Aktivsatz-Syntax werden. Diese Syntaxbausteine sollen sicherstellen, dass die Montageanweisungen präzise und verständlich formuliert und generiert werden, um den Werker klar und eindeutig bei der Ausführung der erforderlichen Montagetätigkeiten zu unterstützen.

Tabelle 5-2 zeigt den syntaktischen Aufbau von Entnahmeoperationen. Die geschweiften Klammern symbolisieren die zu generierenden Teile der Montageanweisung, während die runden Klammern optionale Bestandteile der Anweisung verdeutlichen, die je nach Kontext erforderlich sind.

Tabelle 5-2: Syntaxmodule zur generischen Beschreibung von Entnahmeoperationen

Syntaxbaustein	Beschreibung
{optional: (Anzahl)}	Gibt die Anzahl der zu entnehmenden Bauteile an. Wird nur verwendet, wenn mehr als ein Bauteil entnommen wird
{Bauteil A}	Bezeichnet das spezifische Bauteil, das entnommen wird
{optional: (mit Betriebsmittel)}	Ein optionaler Teil, der angibt, ob ein Betriebsmittel zur Entnahme verwendet wird

Syntaxbaustein	Beschreibung
aus Bereitstellung entnehmen	Beschreibt die Aktion des Entnehmens unter Berücksichtigung des Bereitstellungsorts

Beispiele hierzu sind:

- 2x M8 Schrauben aus Bereitstellung entnehmen
- Basisendplatte mit Manipulator aus Bereitstellung entnehmen
- 8x Federn aus Bereitstellung entnehmen

Hierbei ist zu beachten, dass immer der Syntaxbaustein „aus Bereitstellung entnehmen“ verwendet wird, da die Prozessinformation „Bereitstellungsart“ im Optimalfall In-situ durch das KAS angezeigt wird. Da Bezeichnungen wie „Box 1“ oder „blaue Box“ arbeitsplatzabhängig sind und die entsprechenden Daten in der Arbeitsvorbereitung häufig noch nicht vorhanden sind, ist eine eindeutige Ableitung dieser Informationen aus den Daten/Informationen der Arbeitsvorbereitung oft nicht möglich.

Die syntaktische Struktur von Füge- und Zwischenoperationen ist in Tabelle 5-3 dargestellt. Zielparameter, wie z. B. bestimmte Zahlenwerte mit Einheit (z. B. 5 Nm), werden durch eckige Klammern symbolisiert.

Tabelle 5-3: Syntaxbausteine zur generischen Beschreibung von Füge- und Zwischenoperationen

Syntaxbaustein	Beschreibung
{optional: (Anzahl)}	Gibt die Anzahl der zu fügenden Bauteile an. Wird nur verwendet, wenn mehr als ein Bauteil gefügt wird
{Bauteil A}	Bezeichnet das spezifische Bauteil, das verwendet wird
{optional: (mit Betriebsmittel)}	Ein optionaler Teil, der angibt, ob und welches Betriebsmittel verwendet wird
{optional: ({Präposition} [Zielparameter])}	Ein optionaler Teil, der Zielparameter bei der Verwendung von Betriebsmitteln enthält
{Präposition}	Eine Präposition, die die Beziehung zwischen den Bauteilen oder dem Fügeort bzw. der Fügeposition beschreibt
{Bauteil B oder Fügeort}	Bezeichnet das Basisfügeteil oder den Ort, an dem das Bauteil A angebracht wird
{Verb}	Beschreibt die Aktion des Fügens

Beispiele hierzu sind:

- 2x M8 Schrauben in Spannplatte einfädeln
- 2x M8 Schrauben mit Drehmomentschrauber mit 5 Nm in Spannplatte einschrauben
- Basisplatte mit Manipulator in Fügehilfe einlegen
- 8x Federn in Basisplatte einlegen

Die Syntax zur Beschreibung der Montageoperationen ermöglicht eine Standardisierung der Montageanweisung in Form von definierten Syntaxbausteinen. Durch die Standardisierung der Informationen werden die generierten Montageanweisungen werkergerecht und unabhängig von individuellen Gewohnheiten der Ersteller [RADO99, S. 35]. Der generische Charakter der Syntaxbausteine und der dahinterstehenden Informationsobjekte ermöglicht eine flexible und universelle Anwendung auf unterschiedliche Montageprozesse. Je nach Kontext können bestimmte Syntaxbausteine, wie Betriebsmittel oder Zielparameter, einfach weggelassen werden.

5.2.3 Entwicklung prozessabhängiger Syntaxbausteine für Montageanweisungen

Die einzelnen Syntaxbausteine sind prozessabhängig zu systematisieren, indem festgelegt wird, welche Syntaxbausteine in verschiedenen Konstellationen eines Prozesses zwingend erforderlich sind und welche optional auftreten können. Das Verb repräsentiert den Prozess und ist jeweils der DIN-Norm 8593 Teil 1 bis Teil 8 bzw. der VDI-Richtlinie 2860 entnommen, um eine normbasierte Reproduzierbarkeit zu erreichen. Die VDI-Richtlinie 2860 wurde, wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben, 2018 zurückgezogen, da eine Aktualisierung erforderlich ist, die voraussichtlich 2026 erscheint. In Ermangelung einer adäquaten Alternative wird für die Entwicklung der Syntaxbausteine dennoch auf ihre Prozesse zurückgegriffen. Des Weiteren ist zu beachten, dass die hier identifizierten Montageprozesse als empfohlener Lösungsraum zu verstehen sind und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Die nachfolgende Auflistung basiert auf industriellen Fallbeispielen und Forschungsprojekten und stellt einen erfahrungsbasierten Versuch dar, den von LUŠIĆ entwickelten Prozesskatalog aufzugreifen und weiterzuentwickeln [LUŠI17, S. 84–94]. Ziel ist es, relevante Prozesse und die dazugehörigen Syntaxbausteine zu identifizieren, die in die generische Syntax zur Erstellung von Montageanweisungen überführt werden können.

Im ersten Schritt werden zunächst die Prozesse aussortiert, die nicht in den Bereich der manuellen Montage und damit in den Einsatzbereich Kognitiver Assistenzsysteme fallen. Vor- und nachbereitende Aufgaben wie das (Um-)Rüsten und die montagenahe Kommissionierung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Eine ausführliche Betrachtung aller weiteren aussortierten Prozesse ist mit Begründung im Anhang C in Tabelle C-1 dargestellt.

Im zweiten Schritt werden die relevanten Montageprozesse identifiziert und jedem Prozess systematisch die entsprechenden Syntaxbausteine bzw. die zugehörigen Informationsobjekte für die generische Syntax zugeordnet. Ein exemplarischer Aufbau eines Syntaxbausteins ist in Tabelle 5-4 dargestellt, um die Struktur und den Anwendungsrahmen zu verdeutlichen. In diesem Beispiel repräsentiert die ON 4.12 den Prozess „Ineinanderschieben“, der vereinfacht als „einschieben“ bezeichnet wird. Die Tabelle zeigt zudem an, dass für diesen Prozess ein Manipulator als Betriebsmittel erforderlich sein kann, während keine spezifischen Zielparameter oder Verbindungselemente notwendig sind. Der zweite Prozess, „Schrauben“ (ON 4.3.1, vereinfacht: „einschrauben“), ist nur durchführbar, wenn zuvor der Prozess „Ineinanderschieben“ (ON 4.1.2) erfolgreich abgeschlossen wurde, da dieser die Schraube positioniert. Dabei kann der Einsatz eines Betriebsmittels, wie beispielsweise eines Drehmomentschraubers, erforderlich sein. Das Drehmoment wird als Zielparameter spezifiziert, während eine Schraube als Verbindungselement definiert ist.

Tabelle 5-4: Auszug prozessbezogener Aufbau Syntaxbausteine

ON	Prozess	Vereinfachter Begriff	Zusammensetzung	Präposition	Betriebsmittel	Potentieller Zielparameter	Verbindungselement
4.1.2	Ineinanderschieben	einschieben	-	in/zwischen/unter	z.B. Manipulator	-	-
4.3.1	Schrauben	einschrauben	4.1.2	in	z.B. Drehmomentschrauber	Drehmoment [Nm]	z.B. Schrauben, Muttern, Bolzen

Tabelle C-2 und Tabelle C-3 im Anhang C listen alle identifizierten Montageprozesse auf und sind in ihrer Struktur analog zu Tabelle 5-4 aufgebaut. Die Tabellen umfassen alle identifizierten Montageprozesse mit ihren Ordnungsnummern, die sich auf die entsprechenden DIN-Normen (DIN 8593, Teil 1-8) oder VDI-Richtlinien (VDI 2860) beziehen.

Nachdem die Syntax für die teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen prozessbezogen erläutert wurde, werden nun zur Vervollständigung der Informationsobjekte des Modells die Prozessinformationsobjekte „Warnungen“ und „Fehlermeldungen“ näher betrachtet. Dazu wird für jeden Prozess eine entsprechende Warnung und eine Fehlermeldung definiert, die spezifische Aspekte und typische Probleme des jeweiligen Prozesses berücksichtigen. Diese Informationen stellen sicher, dass Werker stets über potenzielle Risiken informiert sind und klare Korrekturanweisungen im Falle auftretender Fehler erhalten.

Das Informationsobjekt „Warnung“ dient der Prävention und soll durch eine klare Struktur die Aufmerksamkeit der Werker auf potenzielle Gefahren bzw. kritische Aspekte (häufige Fehler) bezüglich des entsprechenden Prozesses lenken.

Jede Warnung umfasst folgende Elemente:

- **Aufmerksamkeitsmarker:** Beginnt mit „Achtung“, um die Aufmerksamkeit des Mitarbeiters auf mögliche Risiken zu lenken.

- Prozessspezifische Warnung: Beschreibt spezifische Risiken, die mit dem Prozess verbunden sind (z. B. „Korrekte Ausrichtung Bauteil A beachten“).
- Pluralprüfung: Wenn mehrere Bauteile oder Verbindungselemente benötigt werden, erinnert die Warnung daran, alle Teile zu berücksichtigen, um Fehler zu vermeiden (z. B. „Keine Höhenausgleichsfolie vergessen“).

Das Informationsobjekt „Fehler“ zielt darauf ab, potentielle prozessabhängige Fehler in einer Fehlermeldung abzubilden, die bei Bedarf durch das KAS gezeigt wird. Jede Fehlermeldung umfasst:

- Aufmerksamkeitsmarker: Beginnt mit „Stopp“, um den Montageprozess zu unterbrechen.
- Prozessspezifische Fehlermeldung: Hebt typische Fehler hervor, die für den jeweiligen Prozess charakteristisch und besonders wahrscheinlich sind (z. B. „Verschraubung außerhalb der Toleranz!“).
- Korrekturanweisung: Gibt eine klare, umsetzbare Anweisung zur Behebung des Fehlers (z. B. „M8 Schraube mit Drehmomentschrauber mit 5 Nm in Bauteil A einschrauben“).

Durch den Einsatz dieser Prozessinformationsobjekte wird jeder Montageprozess, wie im Anhang C in Tabelle C-4 und Tabelle C-5 dargestellt, mit spezifischen Warn- und Fehlermeldungen ergänzt. Dies sorgt für eine konsistente und verständliche Kommunikation von Risiken und Korrekturanweisungen und trägt somit zur Steigerung der Montagequalität und -effizienz bei.

Basierend auf der entwickelten Modellierung erfolgt im nächsten Kapitel die Ableitung eines modularen und ergonomischen Aufbaus sowie die richtlinienkonforme Gestaltung von Montageanweisungen.

5.2.4 Richtlinienbasierte Gestaltung von Montageanweisungen

Für die Erstellung von standardisierten und ergonomischen Montageanleitungen in der industriellen Produktion existieren bisher keine einheitlichen Richtlinien, sondern lediglich rudimentäre Leitfäden, die entweder firmeninternen Charakter haben oder für gänzlich andere technische Dokumente konzipiert sind [LANG07, S. 41]. Die Entwicklung der Montageanweisung für den AIG und das nutzeradaptive KAS orientiert sich grundsätzlich an der Ergonomie der Mensch-System-Interaktion und den in diesem Bereich geltenden Normen der DIN EN ISO 9241 sowie an etablierten Prinzipien der Gestaltung visueller Informationen. Ziel ist es, eine standardisierte, intuitive und normgerechte Struktur für eine Montageanweisung zu schaffen, die den Arbeitsprozess unterstützt und die kognitive Belastung des Werkers minimiert.

Die Gestaltung der Montageanweisungen basiert auf den Anforderungen der DIN EN ISO 9241-11 (Gebrauchstauglichkeit), DIN EN ISO 9241-110 (Interaktionsprinzipien)

und DIN EN ISO 9241-112 (Grundsätze der Informationsdarstellung) [DIN18b; DIN20; DIN17]. Diese Normen definieren folgende Schlüsselkriterien:

- Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit (ISO 9241-11): Die Anweisungen müssen den Montageprozess effektiv unterstützen, dabei effizient in der Nutzung sein und die Zufriedenheit der Nutzer fördern.
- Interaktionsprinzipien (ISO 9241-110): Die Arbeitsinformationen müssen aufgabenangemessen, selbstbeschreibungsfähig, erwartungskonform und lernförderlich sein.
- Informationsdarstellung (ISO 9241-112): Informationen sollen kompakt, konsistent, eindeutig und auf die relevanten Inhalte beschränkt sein.

Zusätzlich fließen Gestaltungsrichtlinien ein, die in der Literatur beschrieben sind. Diese umfassen folgende Prinzipien:

- Lesbarkeit: Detailreiche Bilder sollten nicht zu klein dargestellt werden, und bei Texten ist auf einen ausreichenden Kontrast zwischen Schriftfarbe und Hintergrund zu achten [LANG07, S. 25; HINR21, S. 92–94; TEUB21, S. 133].
- Farbwahl: Die Anzahl der verwendeten Farben pro Bild sollte auf 5 ± 2 begrenzt werden, wobei eine semantische Farbcodierung zur Hervorhebung wichtiger Elemente verwendet werden kann [RADO99, S. 63; TEUB21, S. 133].
- Regelmäßigkeit und Kontinuität: Elemente sollten nach einem festen Schema angeordnet werden und Format- oder Positionsänderungen zwischen verschiedenen Ansichten sollten vermieden werden [RADO99, S. 63; HINR21, S. 92–94].
- Zugehörigkeit und Ausrichtung: Zusammenhängende Inhalte wie Bilder und Texte sollten nahe beieinander positioniert oder optisch einheitlich gestaltet werden (z. B. gleiche Farben oder Proportionen) [HINR21, S. 92–94; TEUB21, S. 133].
- Balance und Symmetrie: Die optische Gewichtung der Elemente sollte in den Quadranten eines Layouts ausgewogen sein. Symmetrische Anordnungen können Balance erzeugen, aber auch asymmetrische Layouts können durch bewusste Gestaltung wirksam sein [LANG07, S. 25; TEUB21, S. 133].
- Proportion und Horizontalität: Ästhetisch empfundene Verhältnisse, wie z. B. ein Verhältnis von Breite zu Höhe von 3:2, verbessern die Lesbarkeit. Elemente, die breiter als hoch sind, sollten bevorzugt werden [LANG07, S. 25; TEUB21, S. 133].

Der daraus abgeleitete Aufbau der Montageanweisung ist beispielhaft in Abbildung 5-8 veranschaulicht und orientiert sich an der didaktischen Klarheit von Lego-Bauanleitungen. Diese setzen gezielte farbliche Akzente ein, um wichtige Elemente hervorzuheben und den Fokus zu lenken. Wiederkehrende Symbole, Schriftarten und Layouts fördern dabei die Konsistenz und Standardisierung, was die Wiedererkennbarkeit

erhöht und die kognitive Belastung reduziert. Die Montageanweisung ist sowohl für die In-situ-Projektion als auch für die Darstellung auf einem Bildschirm geeignet.

Der Aufbau der Montageanweisung für die Kompetenzstufen I und L ist in vier Quadranten unterteilt:

- Quadrant 1 (oben rechts) ist der größte und prominenteste Quadrant und zeigt in Stufe I eine Animation des Fügevorgangs und in Stufe L ein Bild.
- Quadrant 2 (oben links) zeigt das hinzukommende Bauteil, das gefügt wird.
- Quadrant 3 (unten links) enthält einen prozessspezifischen Warnhinweis mit einem entsprechenden Piktogramm. Hierbei wird eine Farbcodierung verwendet, bei der das Wort „Achtung“ in rot hervorgehoben ist. In den Kompetenzstufen U und O besteht die Montageanweisung ausschließlich aus Quadrant 3, wird aber nur gezeigt, wenn bei diesem Prozess in den letzten drei Durchgängen ein Fehler gemacht wurde.
- Quadrant 4 (unten rechts) enthält die Textanweisung für den Fügevorgang. Farbcodierungen unterstützen das Verständnis: Präpositionen, die die Relation zwischen Fügepart und Montageobjekt beschreiben, sind in Blau dargestellt. Zahlen (im Bild nicht sichtbar) sind grün hervorgehoben und geben an, wie viele Bauteile im Prozess zu fügen sind.

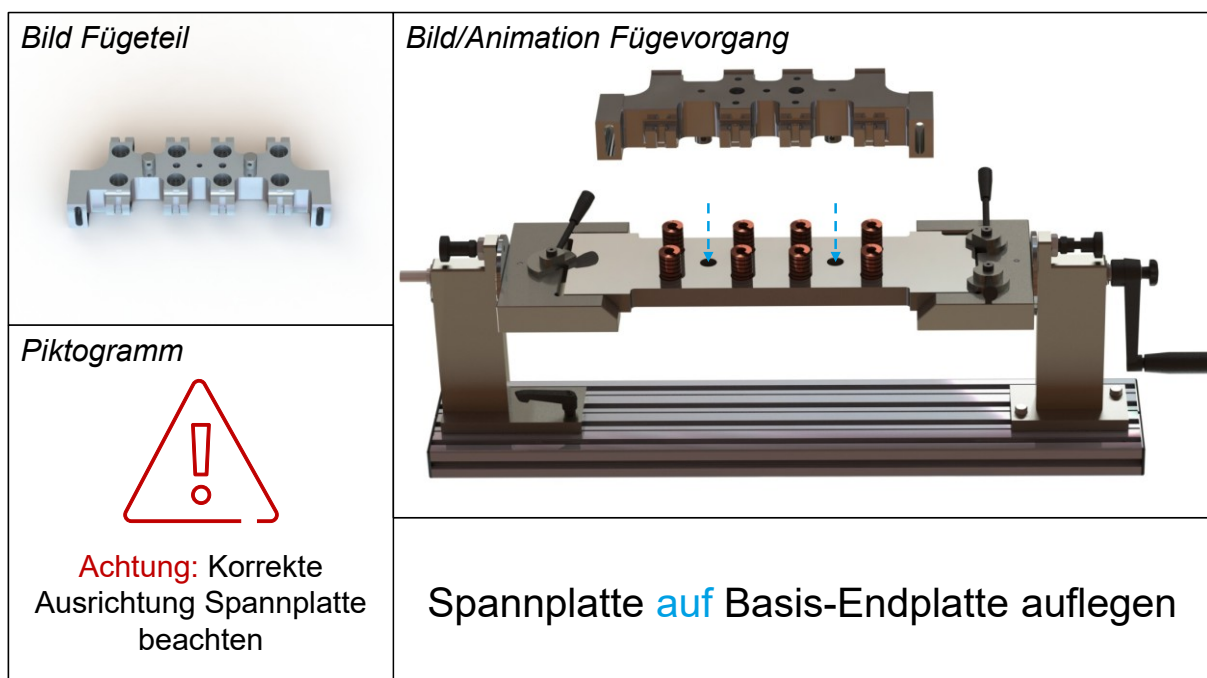


Abbildung 5-8: Aufbau Montageanweisung

Der Aufbau der Montageanweisung orientiert sich an dem in der Praxis bewährten Prinzip der Doppelcodierung, bei dem Bildinformationen mit wenigen textlichen Hinweisen kombiniert werden [HINR21, S. 94]. Diese Kombination erleichtert die

Informationsaufnahme und fördert die intuitive Verständlichkeit. Der Aufbau berücksichtigt die unterschiedlichen Anforderungen der Kompetenzstufen, wobei Bild- und Textelemente klar strukturiert und farblich codiert sind, um die Informationsaufnahme zu erleichtern.

Zusammenfassend wurde in diesem Kapitel ein generisches Modell entwickelt, das alle relevanten Informationsobjekte der manuellen Montage systematisch abbildet und in eine standardisierte Syntax überführt. Diese bildet die Grundlage für eine teilautomatisierte, kompetenzgerechte und normgerechte Erstellung von Montageanweisungen, deren richtlinienbasierte Gestaltung ebenfalls dargestellt wurde.

6 Prototypische Umsetzung des Systementwurfs

Nachdem die Systementwurfsphase sowie die Modellbildung und Analyse (Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2) abgeschlossen sind, widmet sich dieses Kapitel der Systemintegration in Form einer prototypischen Umsetzung. Dazu werden zunächst die Entwicklung und die Funktionen des zugrundeliegenden Demonstrators beschrieben. Daraufhin wird erläutert, wie das Kompetenzstufenmodell zur Nutzeradaptivität als Bestandteil des Recommender-Systems praktisch umgesetzt werden kann. Anschließend wird die Implementierung des AIG ausgeführt.

6.1 Entwicklung Demonstrator

Als Teil der methodischen Vorgehensweise (vgl. Kapitel 4.2) wird in diesem Kapitel ein nutzeradaptives KAS entwickelt, das als Proof-of-Concept-Demonstrator sowohl zur Durchführung von Versuchen als auch zur Evaluierung der Lösungsansätze dient. Hierzu wurde im Rahmen des Forschungsprojekts H2SkaProMo („Skalierbare cyberphysische Produktionssysteme zur Montage von Brennstoffzellen-Stacks“) eine menschenzentrierte, manuelle Vormontagestation entwickelt, in die ein KAS integriert wird. In dieser als Einzelplatzmontage organisierten Station erfolgt die Montage der Kopf- und Basisbaugruppe eines Proton Exchange Membrane (PEM) Brennstoffzellen-Stacks für Mobilitätsanwendungen.

6.1.1 Technischer und konzeptioneller Rahmen des Demonstrators

Ein PEM-Brennstoffzellen-Stack besteht im Wesentlichen aus mehrfach gestapelten Bipolarplatten und Membran-Elektroden-Einheiten (MEA, engl. Membrane Electrode Assembly). Eine einzelne Brennstoffzelle setzt sich dabei aus einer Bipolarplatte, einer MEA und einer weiteren Bipolarplatte zusammen. Diese gestapelte Struktur wird – aus dem Englischen entlehnt – als Stack bezeichnet. Der Stack wird beidseitig durch eine Kopf- und eine Basisbaugruppe abgeschlossen. Diese übernehmen zwei zentrale Aufgaben. Zum einen bündeln sie den im Stack erzeugten elektrischen Strom, zum anderen bilden sie die Schnittstelle zur externen Medienversorgung, über die Wasserstoff, Luft (als Sauerstoffträger), Kühlmittel sowie das Reaktionswasser zu- bzw. abgeführt werden. [HAAS25a]

Abbildung 6-1 zeigt exemplarisch den Aufbau der Basisbaugruppe, die – wie die Kopfgruppe – eine sogenannte Stromsammlergruppe enthält. Diese besteht aus einer Stromsammlerplatte, einer Isolationsplatte, einem Isolationsblock sowie einer Höhenausgleichsfolie. Die Stromsammlerplatte leitet den Strom über eingebaute Muttern an externe Abnehmer weiter.

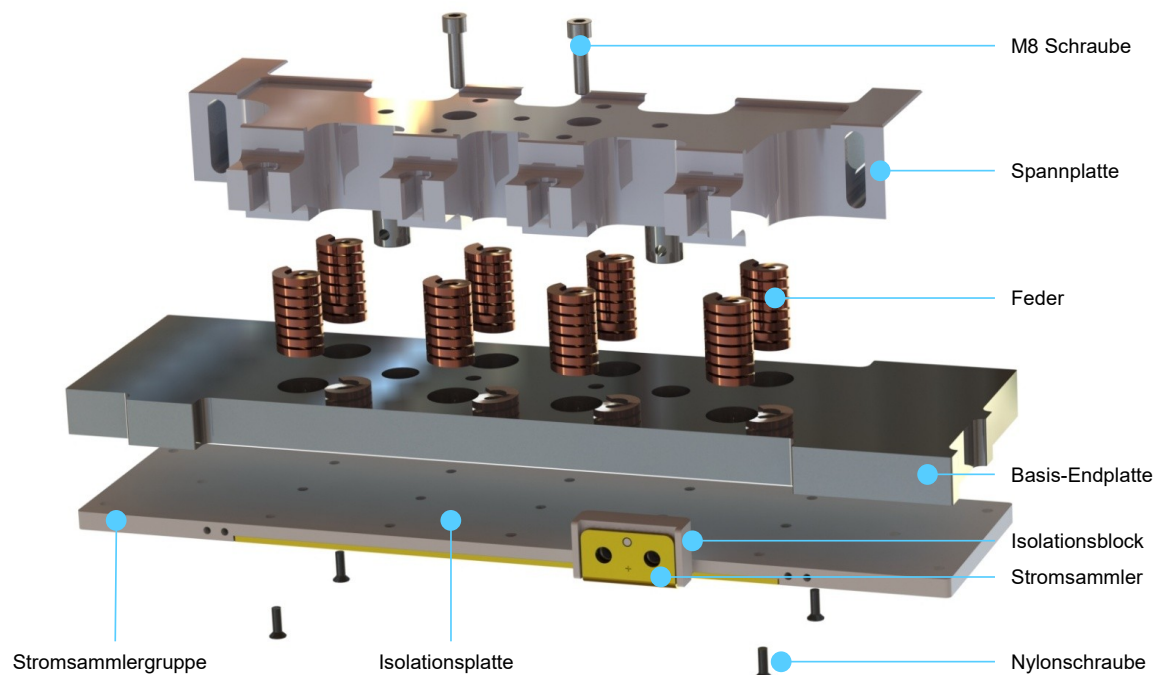


Abbildung 6-1: Explosionsdarstellung der Basisbaugruppe eines PEM-Brennstoffzellen-Stacks

Die Dynamik des sich im Hochlauf befindlichen Marktes für Brennstoffzellen-Stacks führt zu häufigen Produktveränderungen, da während der Prototypenentwicklung kontinuierlich Optimierungen des Flowfields der Bipolarplatten vorgenommen werden. Diese Anpassungen wirken sich direkt auf die Längen- und Breitenverhältnisse der Kopf- und Basisbaugruppe aus und stellen einen Wandlungstreiber dar [HAAS24, S. 35]. Dies erfordert eine wandlungsfähige Gestaltung der Montagestation, um auf Produktveränderungen reagieren zu können. Der Mensch ist, aufgrund seiner kognitiven und motorischen Fähigkeiten für die beschriebene Situation prädestiniert, weshalb die Montageprozesse in der Station manuell durchgeführt werden. Der Werker soll hierbei gezielt durch das nutzeradaptive KAS unterstützt werden.

Vor diesem Hintergrund wird die zugrunde liegende Vormontagestation als Bestandteil des Projekts H2SkaProMo als menschenzentriertes Montagesystem konzipiert. Hierzu wird im Rahmen einer weiteren Dissertation am Lehrstuhl für Montagesysteme ein generisches Software-Framework für ein Recommender-System entwickelt, das zentrale Arbeitsplatzdimensionen – wie Arbeitshöhe, Blick- und Greifbereich, Beleuchtung sowie die Nutzung von Informations- und Assistenzsystemen – berücksichtigt [HAAS25b, S. 2–3].

Das Framework gliedert sich in mehrere Module. Die vorliegende Dissertation weist dabei Berührungspunkte zu drei dieser Module auf:

- Das Erfassungsmodul ermöglicht sowohl die in-prozessuale Kontexterfassung (z. B. Arbeitsschritt, Produkttyp, Varianteninformationen) als auch die in-

prozessuale Menscherfassung (z. B. Leistung, Geschwindigkeit, Fehlerverhalten). Diese Daten bilden die Grundlage für nutzeradaptive Empfehlungen und Systemanpassungen durch das Recommender-System.

- Das Optimierungsmodul, das auf Basis dieser Daten die dynamische Anpassung der Assistenzinhalte steuert.
- Das Kommunikationsmodul, das die grafische Benutzerschnittstelle bereitstellt und über das die Empfehlungen an den Werker kommuniziert werden.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, ein konzeptionelles Fundament für die Dimension „Nutzung von Informations- und Assistenzsystemen“ im Optimierungsmodul zu schaffen, das im Recommender-System praktisch umgesetzt werden kann.

Während in der Literatur Recommender-Systeme meist als Systeme zur Generierung personalisierter Empfehlungen für eine Vielzahl von Nutzern in Bezug auf potenziell interessante Produkte oder Inhalte beschrieben werden [MELV10, S. 829], wird der Begriff im Rahmen dieser Dissertation im Sinne eines arbeitsplatzbezogenen Empfehlungssystems verstanden, das gezielte Hinweise zur Verbesserung des Betriebszustands des KAS liefert.

6.1.2 Entwicklung und Konfiguration des Kognitiven Assistenzsystems

Den Ausgangspunkt der Entwicklung bilden die in Kapitel 4.1 definierten Anforderungen sowie der Systementwurf aus Kapitel 5. Da kein am Markt verfügbares KAS die Anforderungen an Wandlungsfähigkeit und Nutzeradaptivität erfüllt (vgl. Anhang A Tabelle A-1), ist eine Neuentwicklung notwendig. Um dabei eine strukturierte und systematische Konfiguration des KAS zu gewährleisten, wird als methodisches Werkzeug zur Ableitung der erforderlichen Funktionen der morphologische Kasten, wie von HINRICHSSEN ET AL. und SPÄKER ET AL. beschrieben (Abbildung 6-2), verwendet.

Ein zentraler Vorteil dieses Ansatzes liegt in der Kombination aus Systematik und Effizienz. Der morphologische Kasten bietet eine umfassende Übersicht über den Lösungsraum und ermöglicht die gezielte Anpassung der Konfigurationselemente an spezifische Anforderungen und Rahmenbedingungen [PETZ22, S. 158].

Die Konfiguration des entwickelten Assistenzsystems erfolgt durch die gezielte Auswahl von Optionen für jede Dimension des morphologischen Kastens (türkis gekennzeichnete Felder). Das entwickelte Assistenzsystem dient der kognitiven Unterstützung des Werkers, indem es die richtigen Informationen („was“) zur richtigen Zeit („wann“) und in der gewünschten Form („wie“) zur Verfügung stellt und damit die Entscheidungsfindung und Ausführung definierter Arbeitsaufgaben erleichtert [CLAE15, S. 924; HINR16, S. 5; MERK21, S. 21]. Die Mensch-Maschine-Interaktion erfolgt multimodal, sowohl über optische und haptische Eingaben als auch über visuelle Ausgaben.

Art der Unterstützung	Kognitiv		Physisch	
Mensch Maschine Interaktion	Unimodal		Multimodal	
Systemsteuerung und Informationseingabe	Manuell (Tasten, Touchscreen)	Verbal (Sprachsteuerung)	Gestikulär (Hand-Tracking)	Bewegungsdaten (Prozess-Tracking)
Eingabeeinheit	Haptisch/taktil	Auditiv	Kinästhetisch	Optisch
Informationsausgabe	Optisch		Akustisch	Haptisch
Ausgabeeinheit	Visuell ortsfest	Visuell mobil	Auditiv	Haptisch
Position Informationsausgabe	Außerhalb des Arbeitsraums	Innerhalb des Arbeitsraums	Überlagernde Darstellung auf dem Montageobjekt	
Individualisierung der Informationsausgabe	Festgelegte Granularität von Informationen	Manuelle Einstellung Granularität von Informa.	Automatische Anpassung der Granularität von Infor.	
Benutzererkennung	Keine	Manuelle Registrierung & Speicherung Werkerprofil	Automatische Registrierung & Speicherung Werkerprofil	

Abbildung 6-2: Morphologischer Kasten zur systematischen Konfiguration eines Assistenzsystems (eigene Darstellung in Anlehnung an HINR16, S. 8; SPÄK21, S. 173)

Das in Abbildung 6-3 dargestellte KAS besteht im Wesentlichen aus Technologien zur Informationsaufnahme und -ausgabe. Die in Klammern angegebenen Ziffern verweisen auf die beschrifteten Systemkomponenten in Abbildung 6-3. Die im nutzeradaptiven Assistenzsystem verbauten Komponenten sind in eine zentrale Steuerungslogik eingebunden, die mit dem von HAAS ET AL. beschriebenen Recommender-System interagiert und darüber gesteuert wird [HAAS25a]. Die Informationseingabe erfolgt über optische Sensoren in Form von drei Tiefenbildkameras (*D400e Serie von FRAMOS*), die auf der *Intel® RealSense™* Stereo-Depth-Sensing-Technologie basieren (1). Diese Kameras liefern die Eingangsdaten für das im Software-Framework verankerte Erfassungsmodul, das sowohl prozessuale als auch nutzerbezogene Informationen verarbeitet. Für die Kommunikation (Ein- und Ausgaben) mit dem Werker im Hinblick auf die Kommunikation der Vorschläge zur Nutzeradaptivität (vgl. 6.2) wird ein kapazitiver Multi-Touchscreen (*FPM-221W*) eingesetzt (3).

Die Informationsausgabe des KAS erfolgt visuell über In-situ-Projektionen. Hierfür wird ein Beamer vom Typ *PA803U* der Firma *NEC* (2) eingesetzt, der mit einem rotationsfähigen Spiegel, dem *Mirror-Head MH10-L* der Firma *Dynamic Institute GmbH*, ausgestattet ist. Dieser wird durch zwei Laserprojektoren *CAD-PRO* (4) von der Firma *LAP GmbH Laser Applikationen* ergänzt. Die Kombination aus Beamer und Laserprojektor für dynamische In-situ-Projektionen basiert auf einem von RUPPRECHT vorgestellten Anwendungsfall zur Montage von Flugzeugkomponenten in der Baustellenmontage [RUPP21].

Die Benutzererkennung erfolgt über ein Near Field Communication (NFC)-Lesegerät (5), das den Mitarbeiterausweis ausliest. Auf Basis des zugeordneten Nutzerprofils

wählt das Recommender-System (näher beschrieben in Kapitel 6.2) produkt- und situationsabhängig die passende Kompetenzstufe aus und gestaltet die Informationsausgabe individuell und kompetenzgerecht.

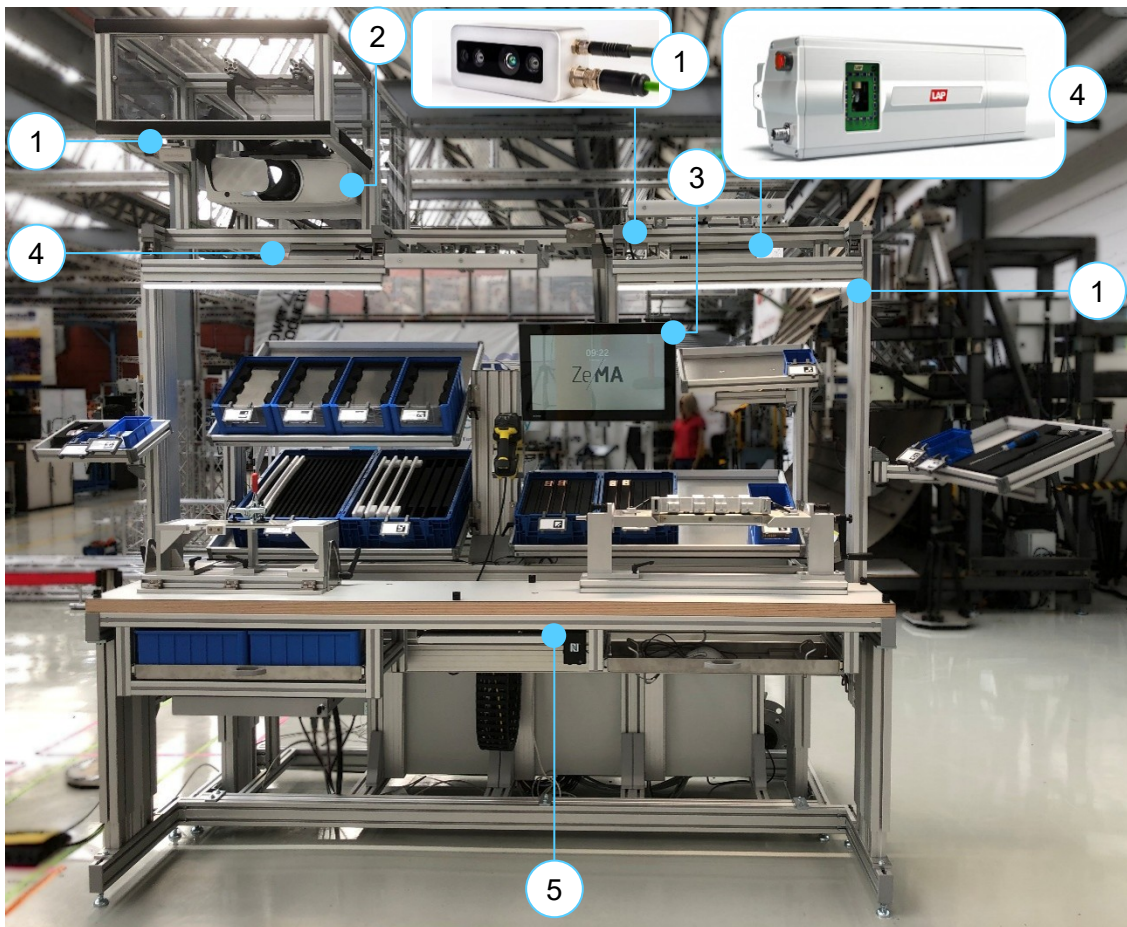


Abbildung 6-3: Umsetzung der manuellen Vormontagestation mit integriertem KAS (Bildquellen SMOD23, LAP 24)

6.1.3 Prozessdatenerfassung und Fehlerdetektion

Die technische Umsetzung der visuellen Informationseingabe wird nicht im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt und liegt außerhalb des Betrachtungsbereichs. Sie ist, wie bereits beschrieben, Teil des Forschungsprojektes H2SkaProMo bzw. des Erfassungsmoduls des generischen Software-Frameworks und wird in HAAS ET AL. im Detail vorgestellt [HAAS25a]. Dennoch wird das zugrunde liegende Konzept im Sinne der Vollständigkeit kurz erläutert, um einen umfassenden Überblick über die Funktionsweise des KAS zu geben.

Die Informationseingabe und -verarbeitung übernimmt zwei zentrale Aufgaben:

1. **Prozesserfassung und Steuerung:** Das System erkennt, an welchem Punkt im Montageprozess sich der Werker befindet, um die Steuerung des KAS darauf abzustimmen und die passende Montageanweisung bereitzustellen (in-prozessuale Kontexterfassung).

2. Erfassung von Prozessdaten: Zur Anpassung des Kompetenzstufenmodells des Recommender-Systems werden Prozesszeiten und Fehler während des Montagevorgangs erfasst und analysiert (in-prozessuale Menscherfassung).

Für die Steuerung des KAS ist es wichtig, den aktuellen Fortschritt im Montageprozess zu erfassen. Gleichzeitig ermöglicht die in-prozessuale Erfassung von Tätigkeitsdaten, wie Prozesszeiten und Fehlerraten, eine dynamische Anpassung des Systems an die individuellen Anforderungen des Werkers.

Die drei Tiefenbildkameras sind in der Lage, den gesamten Arbeitsbereich zu erfassen, und liefern neben zweidimensionalen Bildern auch dreidimensionale Daten, indem sie Tiefenerfassungstechnologien – konkret Infrarotsensoren – nutzen. Die Bestimmung der Prozesszeiten basiert auf der kinematischen Analyse der Bewegungstrajektorien der Hände des Werkers während der Montage. Entscheidend hierfür ist die Festlegung der Handposition innerhalb der Aufnahmeframes der Kamera. Für die Bildauswertung werden Convolutional Neural Networks (CNN) verwendet, konkret das MediaPipe-Modell von Google [LUGA19]. In Abbildung 6-4 ist das Ergebnis der Anwendung des MediaPipe-Modells zur Erfassung von Handgelenkpunkten des Werkers dargestellt.

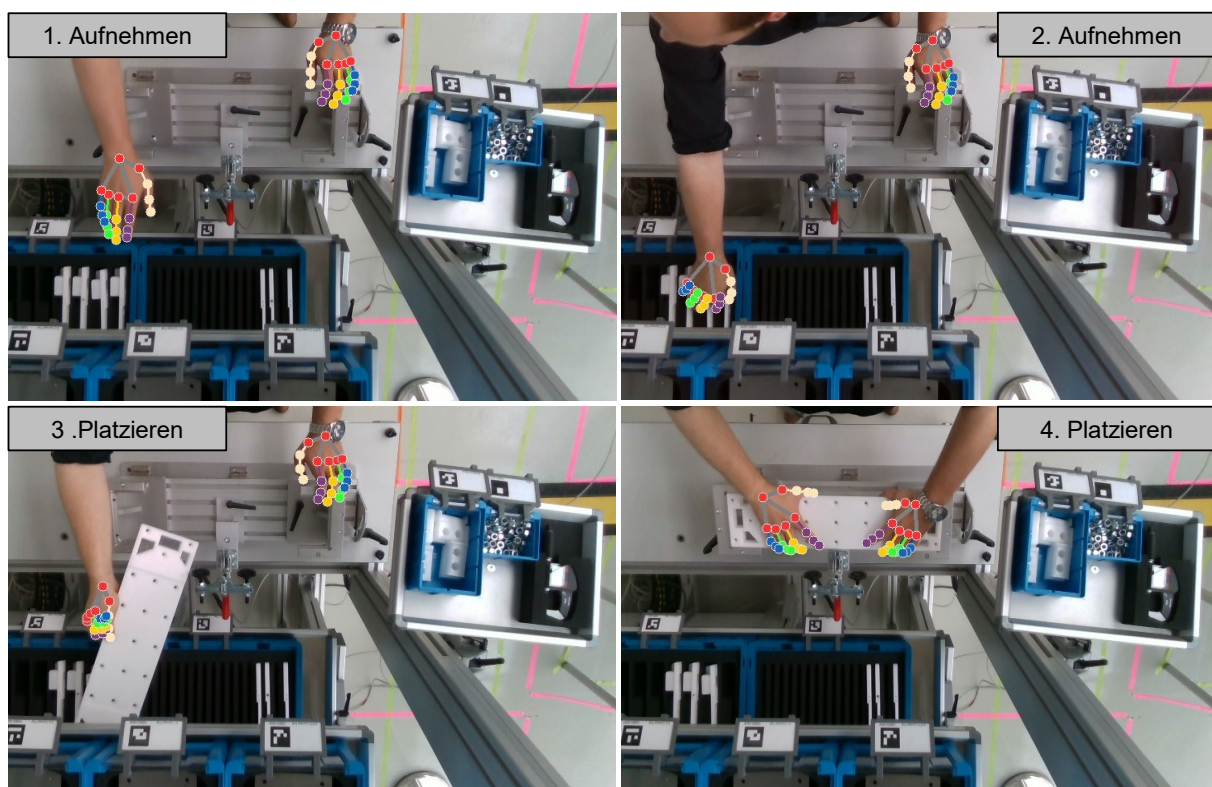


Abbildung 6-4: Erfassung der Handpositionen und Bewegungstrajektorien während der Montage mittels MediaPipe-Modell [HAAS25a]

Es wird in Anlehnung an MTM-UAS, der Beispielprozess „das Aufnehmen einer Isolationsplatte aus der Bereitstellung sowie das Platzieren in eine Montagehilfe“ gezeigt.

Die 3D-Position der Handgelenkpunkte wird relativ zum Kamerakoordinatensystem bestimmt. Aus diesen Daten wird die Bewegungstrajektorie der Hand rekonstruiert. Die Dauer dieser Bewegung – ermittelt anhand der Zeitdifferenz zwischen Start- und Endpunkt der Trajektorie – dient als Prozesszeit für das Kompetenzstufenmodell und steuert zugleich das Triggersignal für das Weiterschalten durch die Assistenzsystemsteuerung.

Montagefehler werden ebenfalls durch die Tiefenbildkameras erkannt und dienen sowohl der Qualitätssicherung als auch der Steuerung des KAS. Hierzu werden, wie in HAAS ET AL. dargelegt, auf dem YOLOv8-Algorithmus basierende CNN-Modelle zur Objektdetektion eingesetzt [ULTR25]. Mit diesen Modellen können Fehler nach vollendeten Platziertätigkeiten erkannt werden. In Abbildung 6-5 ist beispielhaft das Platzieren einer Stromsammelplatte auf einer Isolationsplatte dargestellt – wobei die Stromsammelplatte auf der rechten Seite um 180° verdreht und somit falsch eingelegt wurde. Für weiterführende Informationen wird auf HAAS ET AL. verwiesen [HAAS25a].

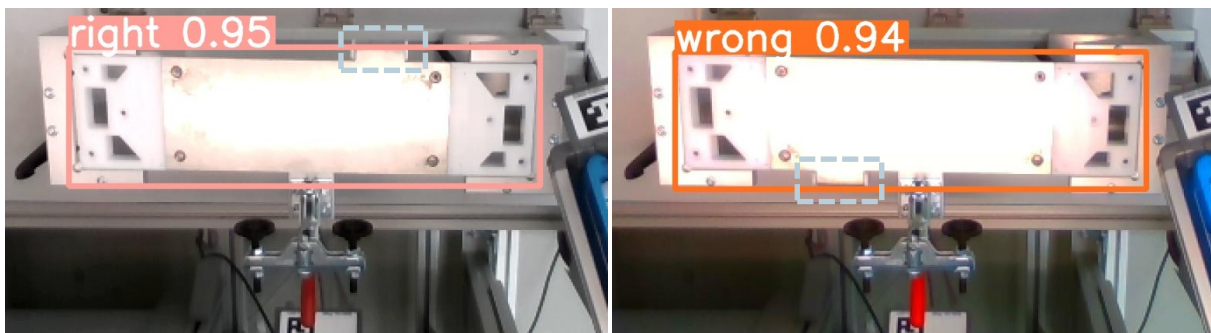


Abbildung 6-5: Erkennung von Montagefehlern durch Objektdetektion mit YOLOv8 [HAAS25a]

6.1.4 Informationsausgabe durch In-situ-Projektionen

Die Wahl der In-situ-Projektion als Methode der Informationsausgabe basiert auf einer Analyse alternativer Technologien. Studien zeigen, dass In-situ-Projektionen die kognitive Belastung der Werker reduzieren und die Effizienz steigern. Im Rahmen einer Untersuchung vergleichen FUNK ET AL. verschiedene Ausgabeeinheiten zur Bereitstellung von Montageanweisungen im Kontext der Einzelplatzmontage hinsichtlich ihrer „Task Completion Time“ (TCT), der Anzahl von Montagefehlern und der kognitiven Beanspruchung. Letztere wird mit dem NASA Task Load Index Score (NASA-TLX) gemessen. Die Ergebnisse in Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 belegen, dass In-situ-Projektionen im Vergleich zu Papieranweisungen, Tablet- und HMD-Systemen in allen untersuchten Kategorien überlegen sind. Sie führen zu einer geringeren Anzahl von Montagefehlern, einem niedrigeren NASA-TLX-Score und einer schnelleren „Task Completion Time“ nach dem General Assembly Task Model (GATM). [FUNK16]

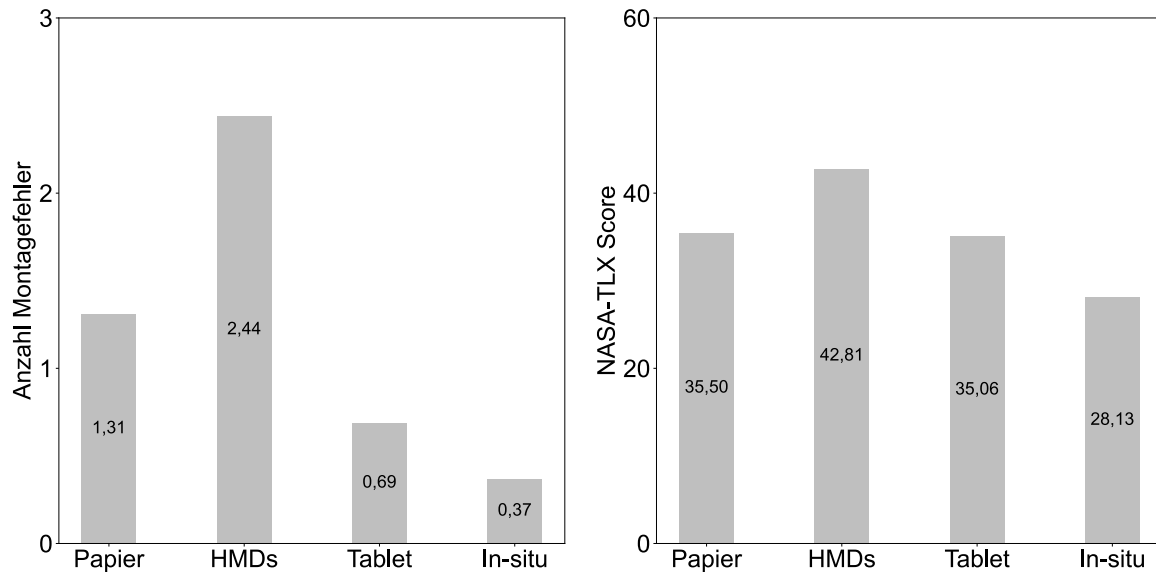


Abbildung 6-6: Vergleich der Anzahl der Montagefehler (links) und der kognitiven Beanspruchung (rechts) verschiedener Umsetzungsformen der Informationsbereitstellung (eigene Darstellung in Anlehnung an FUNK16, S. 937)

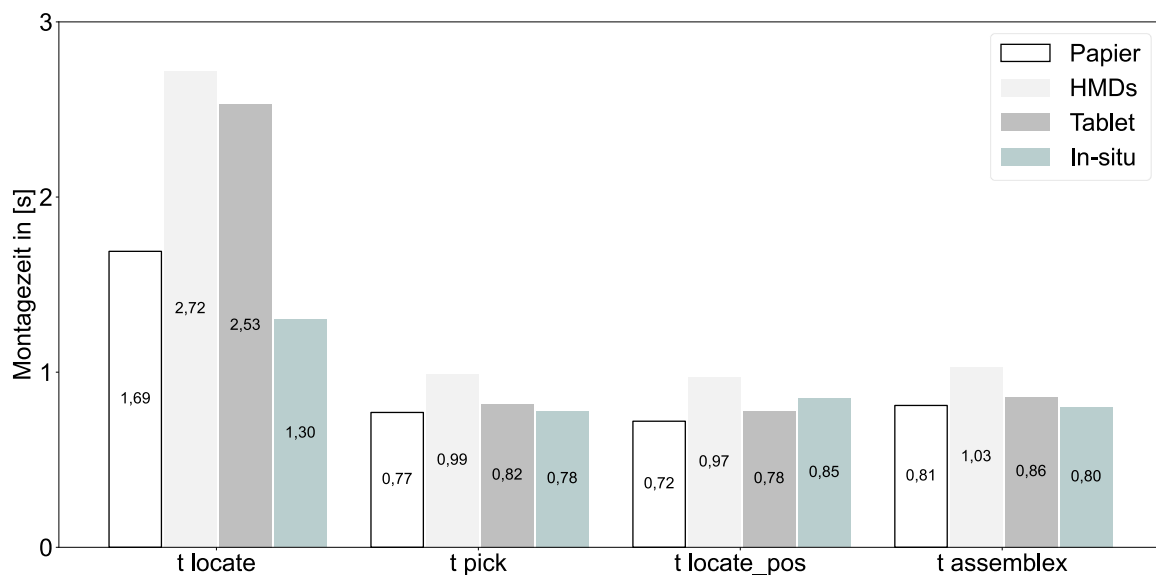


Abbildung 6-7: Vergleich der Montagezeit von unterschiedlichen Montageoperationen bei verschiedenen Umsetzungsformen der Informationsbereitstellung (eigene Darstellung in Anlehnung an FUNK16, S. 936)

Der Vorteil der In-situ-Projektion besteht darin, dass die visuelle Informationsbereitstellung vereinfacht wird, indem relevante Hinweise direkt im Arbeitsbereich angezeigt werden, anstatt sie auf einem externen Bildschirm oder auf Papier bereitzustellen [FUNK18, S. 53]. Dadurch werden zusätzliche Körperbewegungen vermieden, die durch den ständigen Blickwechsel zwischen Bildschirm und Arbeitsaufgabe oder durch das Blättern in Papieranweisungen entstehen [HINR16, S. 4]. Experimente von

MENGONI ET AL. bestätigten die Vorteilhaftigkeit der In-situ-Projektion gegenüber Bildschirm- und HMD-basierten Systemen [MENG18], da keine zusätzlichen Geräte getragen werden müssen und die Informationen direkt in die reale Arbeitsumgebung integriert werden [RODR15, S. 329].

Die Integration des Beamers oberhalb der linken Montagehilfe berücksichtigt sowohl die prozessspezifischen als auch die gestalterischen Anforderungen der Vormontagestation. Der Beamer ist, wie in Abbildung 6-8 dargestellt, nicht zentral über der Arbeitsfläche positioniert, da die Kopfplatte (mittlerer Bereich der Arbeitsfläche) und die Basisendplatte (rechte Montagehilfe) des Brennstoffzellen-Stack aus ergonomischen Gründen mit einem Manipulator auf- bzw. eingelegt und nach Abschluss der Montage wieder entnommen werden müssen. Eine zentrale Anbringung des Beamers würde zu Kollisionen zwischen dem Manipulator und dem Beamergehäuse führen.

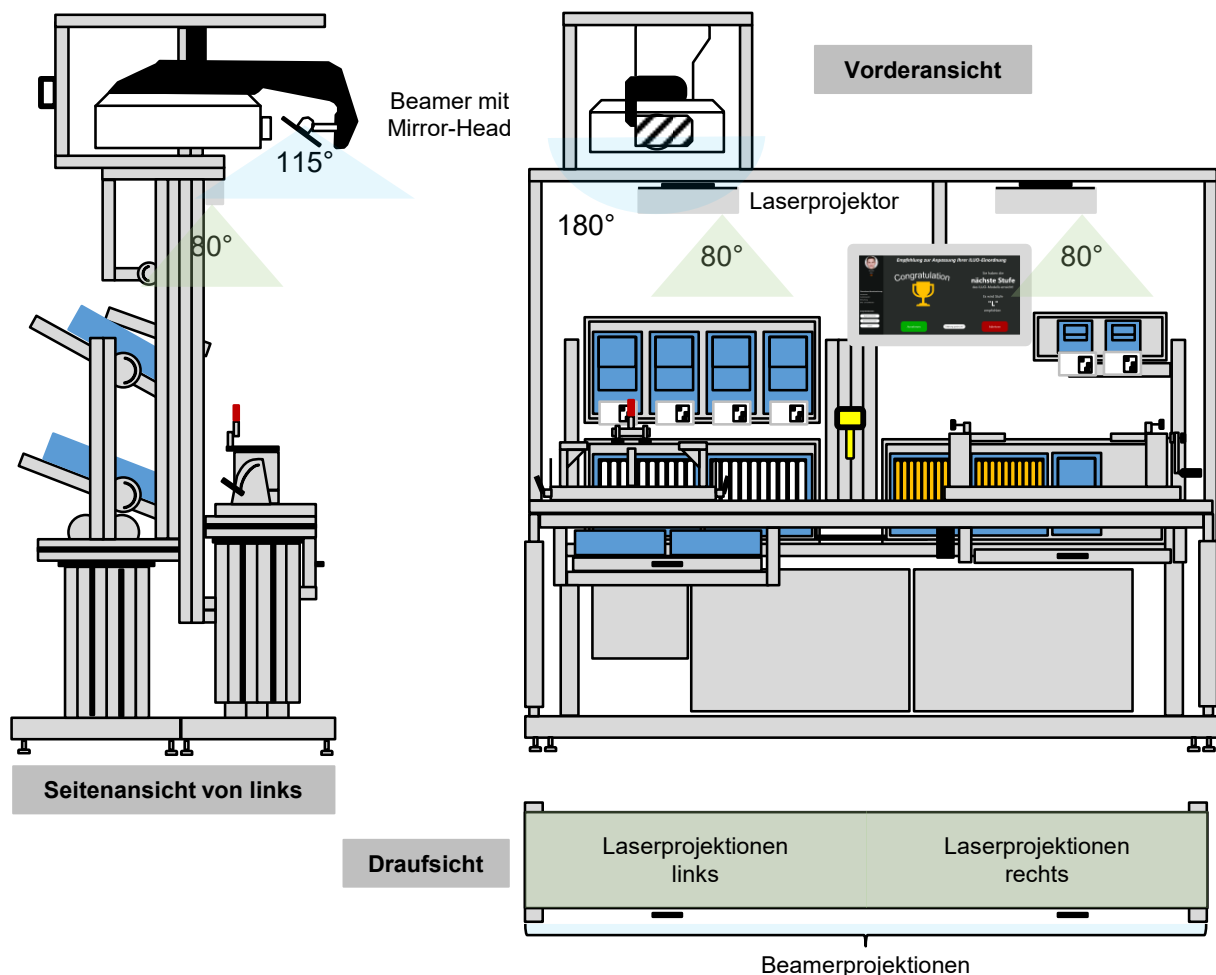


Abbildung 6-8: In-situ-Projektionskonzept zur Informationsausgabe in der manuellen Vormontagestation

Stattdessen ermöglicht das integrierte steuerbare Spiegelsystem (*Mirror-Head L10*), ebenfalls in Abbildung 6-8 dargestellt, eine flexible Bewegung und Verschiebung der Beamerprojektionen im gesamten Arbeitsbereich. Die Projektionsgeräte (Beamer und

Laserprojektoren) haben definierte Abstrahlwinkel. Daraus ergeben sich, je nach Position und Höhe der Geräte, spezifische Projektionsflächen auf unterschiedlichen Ebenen innerhalb der Vormontagestation. Der steuerbare, hochglanzbeschichtete Spiegel bietet einen Neigungsbereich von 115° und einen Drehbereich von 180° [DYNA25]. Der bewegliche Spiegelkopf (*Mirror-Head L10*) lenkt den Projektionsstrahl des Projektors in alle Richtungen des Raumes. Er wird durch eine digitale Steuereinheit und Schrittmotoren präzise in Dreh- und Neigungsrichtung (Pan/Tilt) bewegt.

Dies ermöglicht, wie in Abbildung 6-9 dargestellt, eine montageortspezifische In-situ-Projektion von Montageanweisungen. Die Projektionen werden direkt neben der jeweiligen Montagehilfe positioniert, an der gearbeitet wird. Dadurch werden Blickwechsel reduziert und der Werker bei der Ausführung der Montageaufgabe effizient unterstützt.

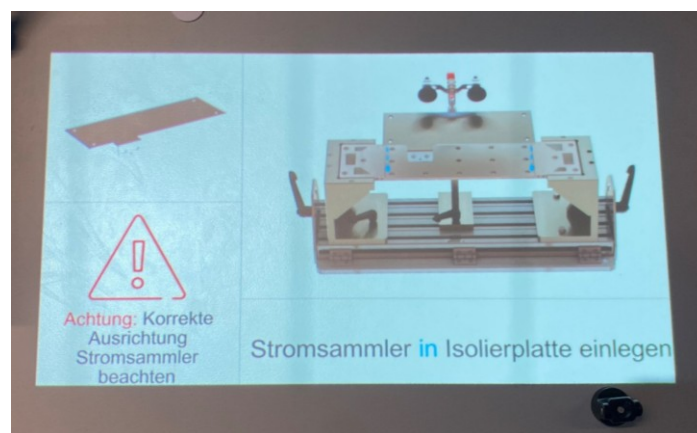


Abbildung 6-9: In-situ-Projektion Montageanweisung Beamer

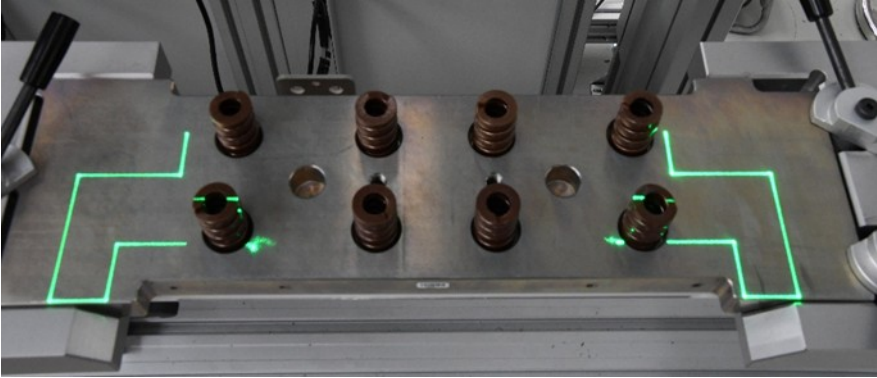

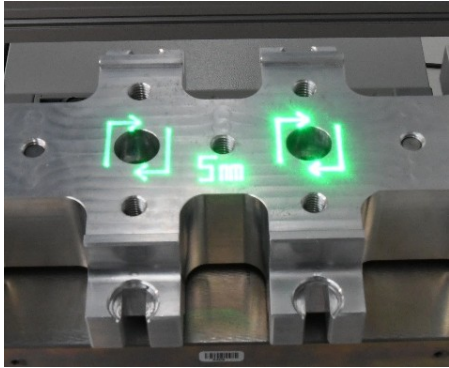

Ergänzend sind zwei Laserprojektoren (*CAD-Pro*) in die Station integriert, die jeweils einen Projektionswinkel von 80° abdecken und im Verbund den gesamten Arbeitsbereich erreichen. Sie ermöglichen, wie in Tabelle 6-1 dargestellt, gezielte Projektionen zur Unterstützung der Fügeoperationen, z. B. durch die Anzeige von Bauteilkonturen, Mess- oder Schraubpunkten. Die Bauteilkonturen zeigen, wie das zu fügende Bauteil relativ zum Basisfügeobjekt ausgerichtet ist und an welcher Stelle es genau platziert werden muss. Zusätzlich unterstützen die Laserprojektoren die Entnahmeoperation. Im Rahmen des Pick-by-Light-Ansatzes markieren sie spezielle Labels auf den Materialbehältern mit der Anzahl der zu entnehmenden Bauteile.

Die In-situ-Montageanweisungen müssen vorab mit einer entsprechenden Software manuell im Arbeitsbereich platziert und als Dateien mit chronologischer Nummerierung gespeichert werden:

- Beamer-Projektionen: Für Stufe I werden die Anweisungen als MP4-Dateien und für die übrigen Stufen als PNG-Dateien mit dem AIG erstellt. Anschließend werden sie mit der Software MDC Project (Medienbearbeitungssoftware inklusive Mapping Engine) des Dynamic Projection Institute als MDC-Datei für den Mirrorhead gespeichert.

- **Laser-Projektionen:** Die Projektionen werden aus CAD-Modellen extrahiert und als DXF-Dateien exportiert. Anschließend werden sie mit der Software ProSoft TP von LAP GmbH Laser Applikationen in LPD-Dateien umgewandelt.

Tabelle 6-1: Übersicht Laser In-situ-Projektionsarten

Fügeoperation	Bauteilkontur	
		
	Messpunkt	Schraubpunkte
		
Entnahmeoperation	Pick-by-Light	
		

6.2 Recommender-System zur Umsetzung der Nutzeradaptivität

In diesem Kapitel werden die technischen und funktionalen Voraussetzungen zur Implementierung des in Kapitel 5.1 vorgestellten Konzepts der Nutzeradaptivität als Teil der Umsetzung des Recommender-Systems beschrieben. Die Umsetzung folgt einem iterativen Ansatz, bei dem konzeptionelle und implementierungstechnische Entscheidungen auf theoretischen Grundlagen, der Modellierung des Kompetenzstufenmodells und bewährten Methoden aus der Literatur basieren. Erkenntnisse aus der in Kapitel 7.2 dargestellten Probandenstudie fließen als Iterationsschritt in die Umsetzung ein. Dies gewährleistet, dass die Bedürfnisse des Menschen und praxisrelevante Erkenntnisse gezielt berücksichtigt werden, wodurch die Eigenschaftsabsicherung des Systems im Rahmen des methodischen Vorgehens nach dem V-Modell erfolgt. Ziel ist es, eine praxisnahe Umsetzung zu demonstrieren, die eine dynamische und individuelle Informationsbereitstellung entsprechend dem ILUO-Kompetenzstufenmodell ermöglicht. Im Folgenden wird zunächst das Konzept zur Umsetzung der nutzeradaptiven Informationsbereitstellung innerhalb des Recommender-Systems beschrieben. Darauf aufbauend werden das Frontend und die Einbindung von Gamification-Elementen erläutert sowie die Realisierung der Erkenntnisse aus der Probandenstudie zur Steigerung der Nutzerakzeptanz und Interaktivität.

6.2.1 Umsetzung der nutzeradaptiven Informationslogik

Das Konzept zur Umsetzung des in Kapitel 5.1.3 eingeführten nutzeradaptiven Informationsbereitstellungsmodells zur kompetenzgerechten Anpassung der Art und Tiefe von Montageanweisungen ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

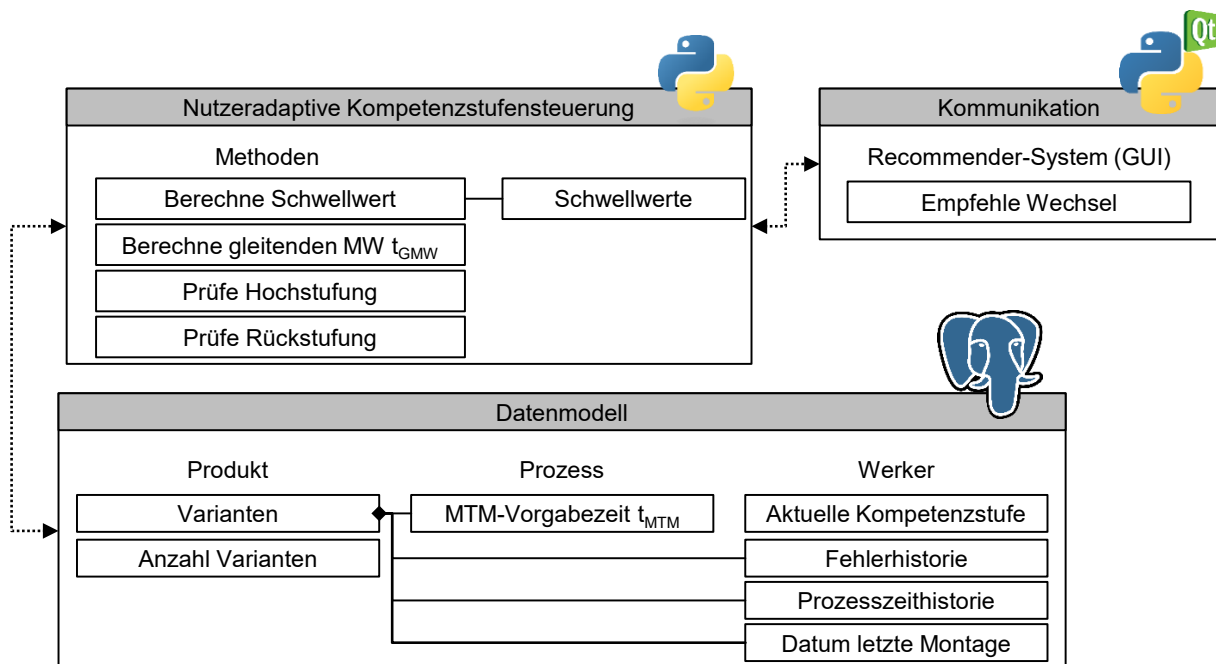


Abbildung 6-10: Konzept zur Umsetzung der nutzeradaptiven Informationsbereitstellung innerhalb des Recommender-Systems

Für die prototypische Implementierung wird Python als Programmiersprache eingesetzt, da es eine Vielzahl leistungsfähiger Bibliotheken und Frameworks für Datenverarbeitung bietet. Die grafische Benutzeroberfläche (GUI) wird mit PyQt realisiert, das auf dem etablierten Qt-Framework basiert und eine flexible und leistungsfähige Plattform für die Entwicklung von Desktop-Anwendungen in Python darstellt. Die Datenverwaltung erfolgt in einer relationalen Datenbank, die in PostgreSQL umgesetzt ist, um eine robuste und skalierbare Datenhaltung sicherzustellen.

Das Konzept zur Umsetzung der nutzeradaptiven Informationsbereitstellung innerhalb des Recommender-Systems besteht aus drei Hauptbestandteilen, die jeweils spezifische Aufgaben erfüllen und eng miteinander interagieren, um die kompetenzgerechte Anpassung von Montageanweisungen an die individuellen Bedürfnisse der Werker zu ermöglichen. Das Datenmodell bildet das Fundament und dient als Referenz für alle produkt-, prozess- und werkerbezogenen Daten. Es basiert auf einer modularen und generischen Struktur, die eine nahtlose Integration in bestehende ERP-Systeme und deren Stammdaten ermöglicht. Das Datenmodell enthält Informationen zu Produkten und deren Varianten, einschließlich variantenabhängiger Prozessdaten wie MTM-Vorgabezeiten. Darüber hinaus werden werkerbezogene Daten erfasst, die ebenfalls variantenabhängig gespeichert werden. Dazu zählen die aktuelle Kompetenzstufe des Werkers, seine Fehlerhistorie, erreichte Prozesszeiten sowie Informationen darüber, wann eine spezifische Variante zuletzt montiert wurde.

Die nutzeradaptive Kompetenzstufensteuerung bildet die logische Grundlage für die Anpassung des Assistenzniveaus im Optimierungsmodul des Recommender-Systems nach HAAS ET AL. [HAAS25b]. Dieses analysiert die im Datenmodell gespeicherten werkerbezogenen Daten wie Prozesszeiten, Fehlerhistorien und den individuellen Kompetenzerwerb, um Werker anhand definierter Schwellwerte einer entsprechenden Kompetenzstufe zuzuordnen. Dabei ermöglicht es eine dynamische Anpassung der Einstufung, sobald sich die Kompetenz des Werkers im Zeitverlauf verändert. Es hilft zudem, spezifische Situationen, wie die Anmeldung eines Werkers an einer Montagestation oder die Montage eines neuen Produkts oder einer neuen Variante zu verarbeiten. In solchen Fällen wird geprüft, ob der Werker das Produkt bereits montiert hat, ob die Anzahl der Varianten die „Magic Number Seven“ (5 ± 2 , nach MILLER) überschreitet – ein Wert, der auf der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses basiert, welches nur eine begrenzte Menge an Informationen gleichzeitig verarbeiten kann – und ob die letzte Montage des Produkts länger als einen Monat zurückliegt [MILL56]. Auf dieser Grundlage entscheidet das Recommender-System, ob der Werker in die Einstiegsstufe I oder direkt in die Stufe L eingeteilt wird. Diese Entscheidungslogik ist in Anhang D in Abbildung D-1 durch ein Flussdiagramm veranschaulicht. Die nutzeradaptive Kompetenzstufensteuerung dient der Implementierung der ILUO-Kompetenzstufenlogik. Sie bildet die Grundlage für variantenabhängige, kompetenzgerechte Montageanweisungen, die auf die individuelle Lernkurve der Werker zugeschnitten sind.

Das Kommunikationsmodul dient als Schnittstelle zwischen dem Recommender-System und dem Werker und wird über ein benutzerfreundliches GUI realisiert. Über dieses Modul werden Vorschläge zur Hoch- oder Rückstufung der Kompetenzstufe kommuniziert, die der Werker aktiv annehmen muss. Im folgenden Kapitel wird diese Schnittstelle detailliert beschrieben, mit besonderem Fokus auf Gamification-Elemente zur Steigerung der Akzeptanz des KAS.

6.2.2 Frontend und Gamification

Ein wesentlicher Aspekt zur Förderung der Akzeptanz Kognitiver Assistenzsysteme ist die aktive Partizipation der Werker. Das Recommender-System ermöglicht den Wechsel zwischen den Kompetenzstufen, indem es Vorschläge zur Anpassung kommuniziert, die der Werker über die interaktive Benutzeroberfläche aktiv annehmen oder ablehnen kann. Wie in Abbildung 6-11 dargestellt, werden positive visuelle Elemente wie eine Trophäe und die Gratulation „Congratulation“ genutzt, um den Stufenaufstieg ansprechend zu vermitteln. Die Wahlmöglichkeit über die Schaltflächen „Annehmen“ oder „Ablehnen“ verleiht dem Werker Autonomie und fördert die Identifikation mit den Entscheidungen des Systems. Dieses Prinzip der freiwilligen Zustimmung stärkt das Vertrauen der Werker und erhöht die Transparenz der zugrunde liegenden Logik – eine zentrale Voraussetzung für die Akzeptanz [MUEL14, S. 555]. Die Schaltfläche „Erklärung gewünscht“ ermöglicht die Anzeige eines Kontextmenüs, das – basierend auf den Erkenntnissen der in Kapitel 7.2 beschriebenen Probandenstudie – detailliert kommuniziert, welche Änderungen bei einem Stufenwechsel vorgenommen werden und welche Informationen entfallen.

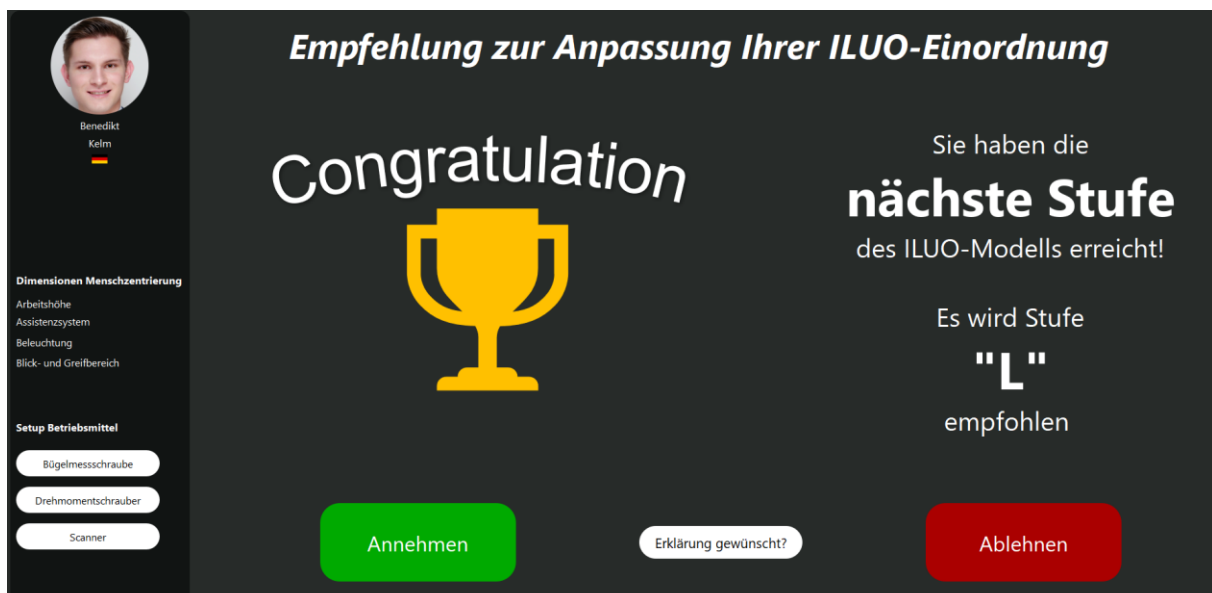


Abbildung 6-11: Empfehlungsdialog zur Anpassung der Kompetenzstufe im ILUO-Modell

Die hier verwendeten Gamification-Prinzipien bieten in diesem Kontext eine Möglichkeit, Motivation und Akzeptanz zu fördern. Der Kerngedanke von Gamification besteht

darin, spielerische Elemente in eine spielfremde Umgebung zu integrieren, um Nutzer zu motivieren, Aufgaben effizienter und mit größerem Engagement auszuführen [HAUG16, S. 422]. Studien zeigen, dass Gamification nicht nur die Leistung im Lernprozess verbessert, sondern auch das Arbeitsumfeld angenehmer gestalten kann [BESG18, S. 857].

Belohnungsmechanismen, wie das Erreichen von Punkten oder Leveln (hier Kompetenzstufen), schaffen dabei einen zusätzlichen Anreiz, Aufgaben fehlerfrei und effizient zu bewältigen [BESG18, S. 856]. Gleichzeitig ist eine transparente Darstellung der Funktionsweise des Systems und dessen Anpassungsmechanismen wichtig, um Vertrauen aufzubauen und die Akzeptanz weiter zu erhöhen [LANG07, S. 34].

6.3 Assembly Instruction Generator

Basierend auf der in Kapitel 5.2 entwickelten Modellierung der Montageanweisungsstruktur und der ableitenden generischen Syntax wird in diesem Kapitel die konkrete Implementierung des AIG beschrieben. Der AIG ist ein Programm zur teilautomatisierten Erstellung und Verwaltung von Montageanweisungen, das darauf abzielt, die Effizienz in der Arbeitsvorbereitung zu erhöhen. In der Arbeitsvorbereitung besteht die Aufgabe darin, Wissen aus der Konstruktion umzusetzen und zusätzliches Wissen über anzuwendende Produktionsabläufe und -prozesse zu generieren [LUŠI17, S. 2]. Der AIG leistet hierbei einen aktiven Beitrag, indem er Montageprozessplaner in der Arbeitsvorbereitung bei der Montageanweisungserstellung für KAS gezielt unterstützt.

Die Systemarchitektur des AIG besteht aus zwei Hauptmodulen. Zum einen das Frontend für die Benutzerinteraktion (Kapitel 6.3.4) und zum anderen das Backend für die Datenverarbeitung und -speicherung der Montageanweisungen (Kapitel 6.3.1) und der Einbindung externer LLMs zur Textgenerierung und -übersetzung (Kapitel 6.3.2 und 6.3.3).

Als Programmiersprache wird auch hier Python verwendet, da es eine breite Palette an Bibliotheken und Frameworks für die Datenverarbeitung und KI-Integration bietet. Für die GUI-Entwicklung wird ebenfalls PyQt eingesetzt. PyQt unterstützt benutzerfreundliche und responsive Oberflächen und eignet sich daher gut für die Visualisierung der Montageanweisungen sowie die Integration von Bildern und Animationen. Für die automatische Generierung und Übersetzung der Montageanweisungen wird die GPT-Technologie von OpenAI verwendet. GPT-Modelle sind aufgrund ihrer hohen Sprachkompetenz und Flexibilität prädestiniert, präzise und konsistente Textanweisungen zu generieren sowie KI-gestützte Übersetzungen bereitzustellen [MEYE24, S. 3]. Darüber hinaus sind GPT-Modelle umfassend dokumentiert und profitieren von einer aktiven Community, die fortwährend neue Anwendungsbeispiele und Optimierungen veröffentlicht. Dies erleichtert die Integration und Weiterentwicklung des AIG und stellt sicher, dass aktuelle Entwicklungen und Best Practices genutzt werden können.

6.3.1 Technische Implementierung des AIG

Für die teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen werden vorhandene Dokumente und Dateien aus der Arbeitsvorbereitung genutzt. Ziel ist es, vorhandene MTM-Analysen (MTM-2 und MTM-UAS) und tabellarische Montagevorranggraphen, die in der Praxis häufig für die Produkte vorliegen – etwa als Excel-Tabellen – als Ausgangsbasis zu verwenden. Dadurch können vorhandene Ressourcen effizient genutzt und der Aufwand für die Erstellung von Montageanweisungen reduziert werden [HOLD20, S. 179].

Die technische Implementierung des AIG basiert auf einem modularen Ansatz, der in Abbildung 6-12 als UML-Sequenzdiagramm visualisiert ist. Das Sequenzdiagramm zeigt die zentrale Interaktion zwischen den Datenquellen, dem Backend und der automatisierten Montageanweisungsgenerierung durch GPT-4o.

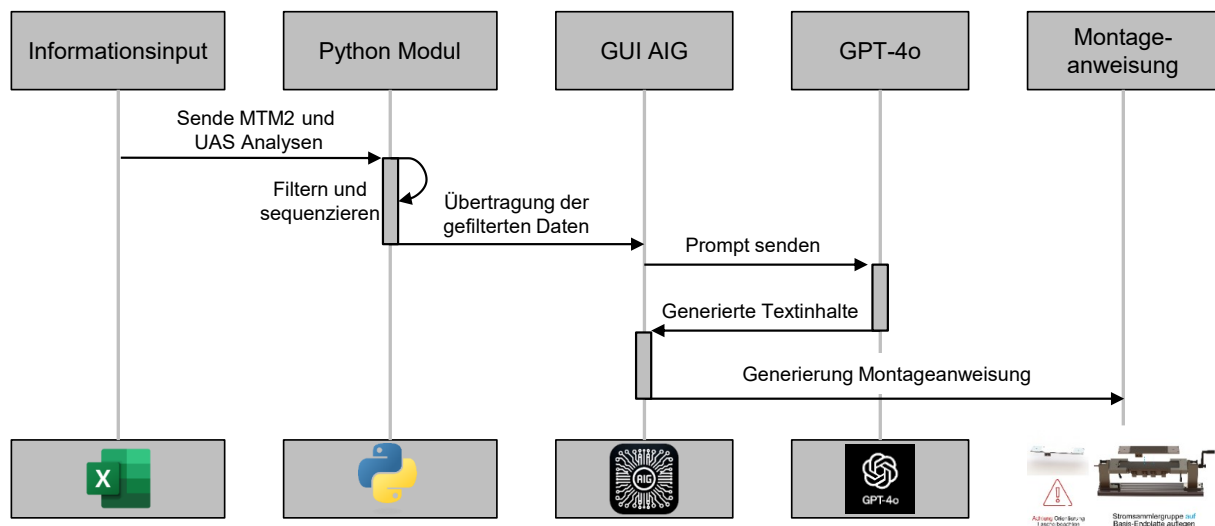


Abbildung 6-12: Sequenzdiagramm zur Generierung von Montageanweisungen mit dem AIG

Das Backend umfasst dabei die Datenverarbeitungsschicht, die für die Extraktion, Aufbereitung und Verwaltung der relevanten Prozessdaten zuständig ist, sowie die Textgenerierungskomponente, in der die GPT-Modelle eingebunden sind. Ein speziell entwickeltes Python-Modul extrahiert zunächst die relevanten Daten aus externen Quellen wie Excel- oder Comma-Separated Values (CSV)-Dateien. MTM-Analysen enthalten neben den Prozessbeschreibungen alphanumerische Codes, die in Verbindung mit TMU-Werten durch das Python-Modul genutzt werden, um relevante Montageprozesse zu identifizieren und zu filtern. Das Python-Modul erfüllt dabei zwei zentrale Aufgaben:

1. Filterung irrelevanter Prozesse: Es isoliert anhand der alphanumerischen Codes die Montageprozesse, die tatsächlich in der manuellen Montagestation ausgeführt werden und entfernt Bewegungen wie Transportvorgänge oder vorbereitende Schritte, die außerhalb des Einflussbereichs des KAS liegen.

2. Sequenzanalyse: Es extrahiert die Reihenfolge der Prozesse aus den Ausgangsdokumenten, um die Montagesequenz im Editor korrekt abzubilden und die Anweisungen strukturiert darzustellen.

Die gefilterten Daten (Prozessbeschreibungen) werden in strukturierter Form als CSV-Datei exportiert und im Editor des AIG weiterverarbeitet. Dort erscheinen sie als Montageoperationen in einer chronologischen Sequenz, die auf Knopfdruck in standardisierte Syntax für Fügeoperationen umgewandelt werden können.

Für die Umwandlung in die standardisierte Syntax für Fügeoperationen und die Generierung der Montageanweisungen bzw. zugehöriger Inhalte, greift der AIG mit einem fallspezifischen Prompt auf verschiedene GPT-Modelle zurück, die über das OpenAI Application Programming Interface (API) integriert sind. Die API dient dabei als Schnittstelle zwischen dem AIG und den GPT-Modellen und ermöglicht eine reibungslose Kommunikation zwischen den Anwendungen. Konkret übernimmt die API die Aufgabe, Textdaten in strukturierter Form an das Modell zu übergeben und die generierten Ausgaben zurückzuleiten. Der Zugriff auf die API erfolgt über einen API-Schlüssel, der sicherstellt, dass ausschließlich autorisierte Nutzer auf die GPT-Modelle zugreifen können.

Im Kontext des AIG wird mit GPT-4o ein zentral gehostetes Modell integriert. Ein zentral gehostetes Modell bietet den Vorteil, dass es bereits auf umfangreichen und vielseitigen Datensätzen vortrainiert wurde. So können die neuesten Fortschritte in der Sprachmodell-Technologie genutzt werden, ohne dass lokale Rechenressourcen in großem Umfang bereitgestellt werden müssen. Ein lokal betriebenes Modell wird für den AIG nicht in Betracht gezogen, da die Infrastrukturanforderungen für die Bereitstellung und das Training eines derart leistungsstarken Modells enorm sind. Zudem liegt der Fokus dieser Dissertation auf dem prototypischen Nachweis des Ansatzes unter realistischen Bedingungen, nicht auf der Entwicklung einer final einsatzreifen Industrieanwendung. Die Verwendung eines zentral gehosteten Modells wie GPT-4o, welches zum Zeitpunkt der Implementierung das neueste und leistungsfähigste verfügbare Modell ist, bietet darüber hinaus den Vorteil, stets auf aktuelle und optimierte Versionen zugreifen zu können.

Eine Übersicht der integrierten GPT-Modelle ist in Abbildung 6-13 schematisch dargestellt.

Es werden drei speziell feinabgestimmte Modelle verwendet:

1. MA-GPT (Montageanweisungs-Generator GPT): Dieses Modell generiert Montageanweisungen auf Basis der strukturierten Prozessdaten aus den MTM-Analysen. Der Fokus liegt auf der korrekten Umsetzung der Syntax und der Erstellung vollständiger Anweisungen (vgl. Kapitel 5.2.2). Es bildet die Grundlage bzw. die Eingabe für die beiden folgenden Modelle.

2. WM-GPT (Warnungsmeldungs-Generator GPT): Dieses Modell erstellt präzise und kontextspezifische Warnungstexte, die aus den Montageanweisungen abgeleitet werden, um die Sicherheit im Montageprozess zu gewährleisten (vgl. Kapitel 5.2.3).
3. FM-GPT (Fehlermeldungs-Generator GPT): Dieses Modell identifiziert potenzielle Fehler und formuliert basierend auf den Montageanweisungstexten Fehlermeldungen und passende Korrekturmaßnahmen (vgl. Kapitel 5.2.3).

Das MA-GPT Modell ist darauf konditioniert, die vorliegenden Prozessbeschreibungen gemäß der vorgegebenen Syntax (vgl. Kapitel 5.2.2) zu interpretieren und daraus automatisch die entsprechenden Syntaxbausteine abzuleiten. Diese Syntaxbausteine werden auf Grundlage der verfügbaren Informationen aus den MTM-Daten erstellt. Dabei berücksichtigt das Modell alle vorhandenen Informationen, wie Prozessschritte, benötigte Werkzeuge (Betriebsmittel) und Werkzeugparameter der Montageoperationen.

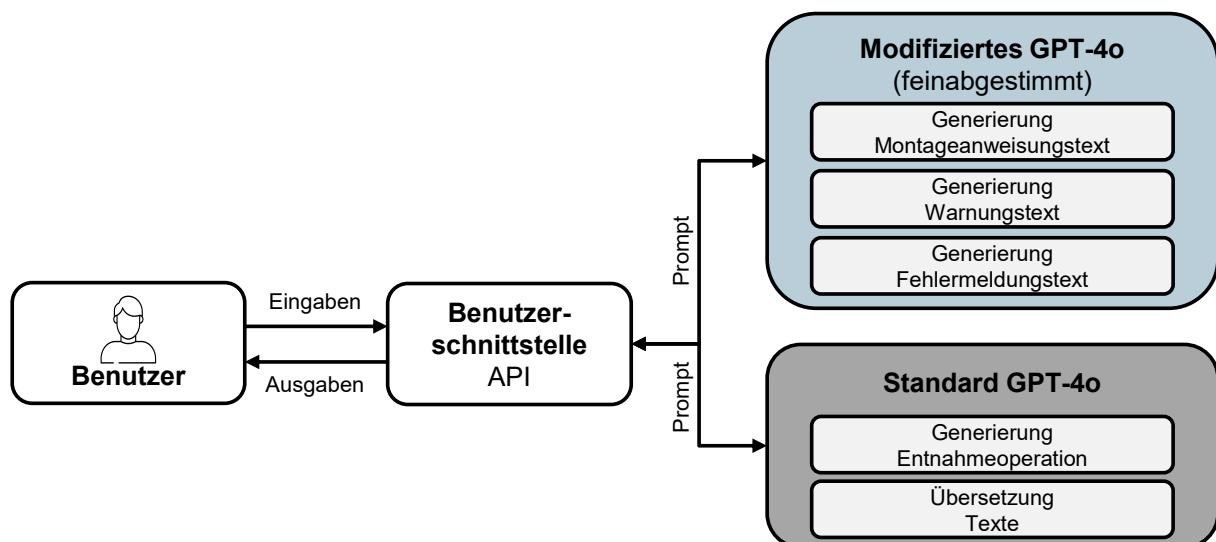


Abbildung 6-13: Integration von GPT-Modellen in den AIG

Wenn bestimmte Informationen, wie z. B. die Verwendung eines Werkzeugs, in den extrahierten Daten fehlen, aber für den spezifischen Montageprozess erforderlich sind, generiert das Modell, wie in Abbildung 6-14 beispielhaft dargestellt, automatisch Platzhalter an den entsprechenden Stellen.

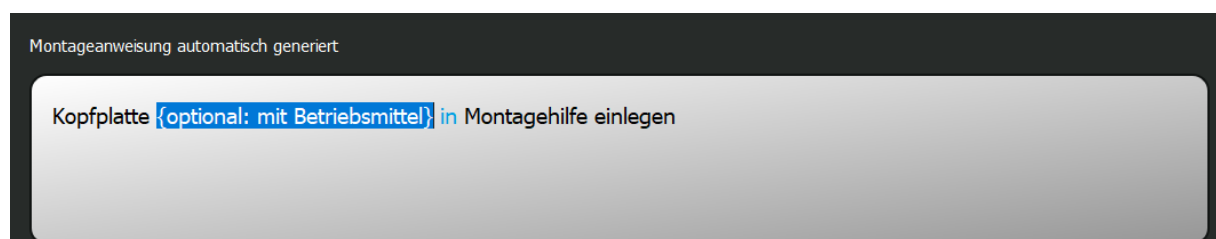


Abbildung 6-14: Beispiel Platzhalter zur Markierung einer unvollständigen Textanweisung

Diese Platzhalter dienen als Markierungen für den Montageprozessplaner, die darauf hinweisen, dass zusätzliche Informationen manuell ergänzt werden müssen, um die Vollständigkeit und Genauigkeit der Montageanweisung syntaxkorrekt zu gewährleisten. Dieser Mechanismus stellt sicher, dass auch bei unvollständigen Eingabedaten keine kritischen Informationen verloren gehen. Gleichzeitig wird der Montageprozessplaner gezielt auf diese Lücken hingewiesen, so dass er sein Expertenwissen einbringen kann [NEB18, S. 1118].

Die durch das GPT-Modell generierten Textanweisungen sind somit standardisiert, folgen der festgelegten Syntax und bieten eine präzise Grundlage für die Montage. Die Kombination aus automatischer Textgenerierung und manueller Überarbeitung ermöglicht eine flexible und zugleich zuverlässige Lösung, die speziell auf die Bedürfnisse der Arbeitsvorbereitung und der Montageprozessplanung zugeschnitten ist.

Zusätzlich wird das Standard-GPT-4o für allgemeine Aufgaben verwendet, wie die Generierung von Entnahmeoperationen und die Übersetzung der Montageanweisungen in andere Sprachen. Diese Aufgaben werden durch strategisch formulierte Prompts gesteuert (vgl. Kapitel 6.3.3), die die gewünschte Ausgabe spezifizieren.

Die finalen Montageanweisungen werden im AIG in Form von PNG-Bildern und MP4-Videos generiert. Mit Hilfe der Python-Bibliothek Pillow werden die Anweisungen für jede der vier Kompetenzstufen in einem Schritt erstellt und formatiert. Die Bilder werden entsprechend der Montagesequenz in 10er Schritten chronologisch nummeriert und gespeichert, um eine eindeutige Reihenfolge zu gewährleisten. So können sie während des Montageprozesses vom KAS in der richtigen Reihenfolge aufgerufen werden.

Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung bzw. das Fine-Tuning der drei beschriebenen GPT-Modelle detailliert erläutert.

6.3.2 Fine-Tuning der GPT-Modelle

Das Fine-Tuning der Modelle ist notwendig, um ihre Leistung für domänenspezifische Anwendungsfälle zu optimieren. Dabei werden die Modelle gezielt an die besonderen Anforderungen der Domänen Montageanweisungen, Warnungen und Fehlermeldungen angepasst, um ihre Genauigkeit zu verbessern. Teile dieses Kapitels sind aus KELM ET AL. adaptiert [KELM25c].

Das Fine-Tuning der drei Modelle erfolgt auf Basis deutschsprachiger Datensätze, da die zugrunde liegenden Anwendungsfälle aus deutschsprachigen Forschungsprojekten stammen. Die Übersetzung der Textanweisungen in andere Sprachen durch den AIG, wie z. B. Englisch, erfolgt über strukturierte Prompts, die an die spezifischen syntaktischen Anforderungen der jeweiligen Sprache angepasst sind und somit präzise Ergebnisse liefern (vgl. Kapitel 6.3.3).

Der Datensatz für das Fine-Tuning des Modells MA-GPT zur Generierung von Montageanweisungen auf der Basis von MTM-Prozessbeschreibungen umfasst 564 MTM-Prozessbeschreibungen. Diese enthalten mindestens zehn Beispiele aller 48 in Tabelle C-2 in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Prozesse. Zusätzlich enthält der Datensatz 564 zugehörige Montageanweisungen in der Soll-Syntax, basierend auf der in Tabelle 5-3 beschriebenen Grundlage und den prozessabhängigen Syntaxbausteinen.

Die Datensätze der Modelle WM-GPT und FM-GPT enthalten jeweils 566 bzw. 755 Beispiele für Montageanweisungen als Eingaben und 566 bzw. 755 Soll-Warnungs- und Fehlermeldungstexte als Ausgaben. Die Ausgaben basieren auf der Logik und den Sprachmustern, die in Kapitel 5.2.3 in Tabelle C-4 und Tabelle C-5 beschrieben sind. Ca. 10% der Beispiele für Prozesse in den drei Datensätzen stammen aus zwei realen Anwendungsfällen, der Montage eines Brennstoffzellen-Stacks und einer Wasserpumpe, beide aus dem Automobilbereich. Um eine ausreichende Datenmenge für das Fine-Tuning zu gewährleisten, werden zusätzliche Beispiele synthetisch erstellt, so dass für jeden Prozess, wie zuvor erwähnt, mindestens zehn Beispiele zur Verfügung stehen.

Die Vorgehensweise des Fine-Tunings ist in Abbildung 6-15 dargestellt und basiert auf den Grundlagen des Fine-Tunings aus Kapitel 2.5.2. Für das Fine-Tuning werden die Datensätze jeweils wie folgt aufgeteilt: 70 % der Einträge werden für das Training, 15 % für die Validierung (Va in Abbildung 6-15) und 15 % für den Test (Te in Abbildung 6-15) verwendet. Diese Aufteilung ermöglicht es, ausreichend Daten für die Optimierung der Modelle bereitzustellen und gleichzeitig eine aussagekräftige Bewertung der Generalisierungsfähigkeit sicherzustellen.

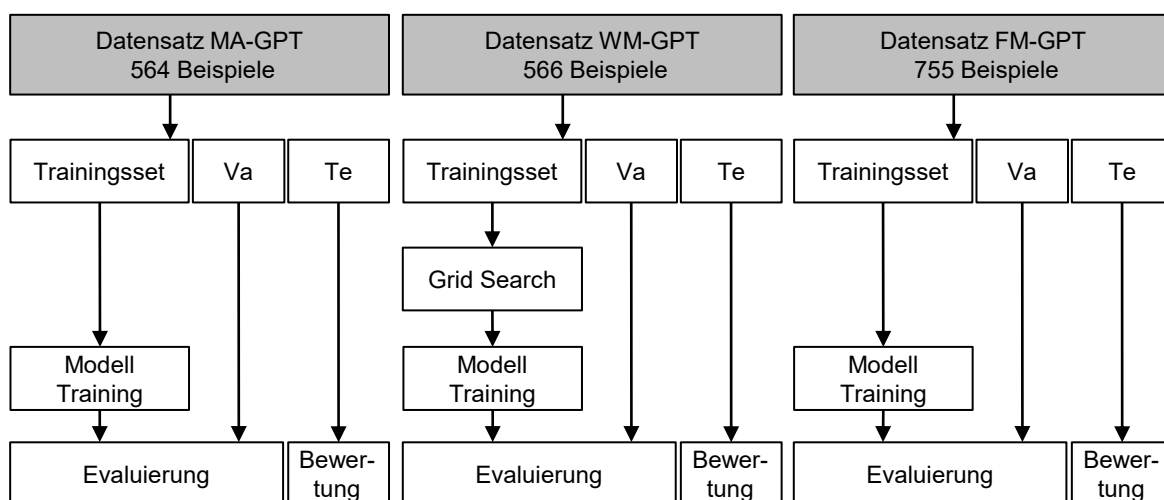


Abbildung 6-15: Vorgehensweise Fine-Tuning

Die Beispiele pro Prozess werden zufällig auf die drei Sets (Trainings-, Validierungs- und Testset) verteilt, um eine ausgewogene Repräsentation der zugrunde liegenden Muster zu gewährleisten. Für die maschinenlesbare Verarbeitung wird der Datensatz in das JavaScript Object Notation Lines (JSONL)-Format konvertiert. Nachdem die

Datensätze vorbereitet und in das JSONL-Format konvertiert wurden, erfolgt das eigentliche Fine-Tuning der Modelle. Dabei wird das Modell iterativ auf dem Trainingsdatensatz trainiert, während es mit dem Validierungsset überprüft und optimiert wird, um eine Balance zwischen Anpassung an die Trainingsdaten und Generalisierungsfähigkeit zu erzielen. Für das Fine-Tuning wird die OpenAI-Plattform verwendet. Diese zeichnet sich durch ihre Benutzerfreundlichkeit aus und ermöglicht eine effiziente Durchführung von Fine-Tuning-Prozessen.

Das Fine-Tuning wird ausschließlich auf Basis des Trainingsdatensatzes durchgeführt. Zur Optimierung der Hyperparameter (vgl. Kapitel 2.5.2) wird die Methode Grid-Search verwendet – eine systematische Vorgehensweise zur Identifikation der optimalen Kombination von Hyperparametern. Die Modelle werden mit Hilfe des Validierungsdatensatzes evaluiert, wobei jeweils nur ein Hyperparameter variiert wird, während die anderen konstant bleiben. Dieses Vorgehen ermöglicht eine gezielte Analyse der Auswirkungen einzelner Hyperparameter auf die Modellleistung und führt zur Identifikation der optimalen Konfiguration im Rahmen der Modellauswahl. Insgesamt werden zwölf verschiedene Kombinationen der folgenden Hyperparameter getestet:

- **Batch-Size:** Gibt an, wie viele Trainingsbeispiele gleichzeitig verarbeitet werden, bevor eine Aktualisierung der Modellparameter erfolgt. Eine größere Batch Size kann zu stabileren Anpassungen führen, benötigt jedoch mehr Rechenleistung. Eine kleinere Batch Size kann das Training beschleunigen, führt aber möglicherweise zu weniger stabilen Anpassungen, da sie stärker von einzelnen Beispielen beeinflusst wird. [MAST18]
- **Learning Rate Multiplier:** Bestimmt die Schrittweite, mit der das Modell seine Gewichte während des Trainings aktualisiert. Eine zu hohe Lernrate kann dazu führen, dass das Modell die optimale Lösung „überspringt“ und nicht konvergiert. Eine zu niedrige Lernrate kann das Training stark verlangsamen oder dazu führen, dass das Modell in einem lokalen Optimum stecken bleibt, ohne die bestmögliche Generalisierung zu erreichen. [GÉRO19, S. 359–360]
- **Number of Epochs:** Gibt an, wie oft das Modell den gesamten Trainingsdatensatz durchläuft. Eine zu geringe Anzahl von Epochs kann zu Underfitting führen, da das Modell nicht ausreichend trainiert wurde. Eine zu hohe Anzahl kann Overfitting verursachen, da das Modell die Trainingsdaten zu stark „auswendig“ lernt und schlechter auf neue, unbekannte Daten generalisiert. [GÉRO19, S. 290]

Zur Überprüfung der Qualität der generierten Outputs werden der BLEU- und der METEOR-Score herangezogen. Diese beiden Scores stellen komplementäre Metriken zur Bewertung der Qualität der generierten Texte für die Evaluierung mit dem Validierungsset und zur Bewertung der Generalisierungsfähigkeit mit dem Testset (vgl. Kapitel 7.1.1) dar.

Der BLEU-Score (BiLingual Evaluation Understudy) misst, wie genau der maschinengenerierte Text mit einem Referenztext übereinstimmt, indem er n-Gramm (Wortfolgen) vergleicht. Der Fokus liegt dabei auf der Präzision, d.h. wie viele Wörter im generierten Text mit denen im Referenztext übereinstimmen, ohne die Berücksichtigung der Abdeckung (Recall), die angibt, wie viel des Referenztextes im generierten Text enthalten ist. BLEU verwendet eine modifizierte n-Gramm-Präzision, um Probleme wie Wortwiederholungen zu vermeiden, indem sichergestellt wird, dass Wörter nicht öfter gezählt werden, als sie im Referenztext vorkommen. Zusätzlich wird eine Kürzungsstrafe (Brevity Penalty) angewendet, um zu kurze Übersetzungen zu bestrafen. [PAPI02, S. 312–316] Im Kontext dieser Dissertation ermöglicht der BLEU-Score die Bewertung der syntaktischen Korrektheit der generierten Montageanweisungen, Warnungen und Fehlermeldungen, basierend auf vordefinierten Soll-Outputs.

Der METEOR-Score (Metric for Evaluation of Translation with Explicit ORdering) zielt darauf ab, die Schwächen des BLEU-Scores zu beheben, indem er sowohl die Präzision als auch den Recall berücksichtigt und die Wortreihenfolge mit einbezieht [BANE05, S. 66]. Der METEOR-Score vergleicht die Wörter des maschinengenerierten Textes mit denen des Referenztextes, wobei exakte Übereinstimmungen, Stammformen und Synonyme berücksichtigt werden. Durch diese flexible Bewertung kann die Bedeutung des Textes besser erfasst werden. Darüber hinaus werden fragmentierte Übersetzungen, bei denen die Wörter zwar korrekt, aber ungeordnet oder unzusammenhängend sind, bestraft. Dies macht den METEOR-Score besonders nützlich, um die Lesbarkeit und Angemessenheit komplexer, semantisch reicher Anweisungen zu bewerten. [BANE05] Der Score ist daher wichtig, um die kontextuelle und semantische Korrektheit der generierten Montageanweisungen, Warnungen und Fehlermeldungen zu beurteilen, da diese sowohl präzise sein müssen als auch den richtigen Kontext vermitteln müssen, um Missverständnisse während der Montage zu vermeiden.

Zur Modellauswahl werden die BLEU- und METEOR-Scores aller getesteten Hyperparameter-Kombinationen systematisch verglichen. Die in Tabelle 6-2 dargestellte Konstellation veranschaulicht das Ergebnis des Grid-Search-Verfahrens für das WM-GPT-Modell. Sie zeigt eine Übersicht der getesteten Kombinationen und hebt Kombination sechs hervor, die die höchsten BLEU- und METEOR-Scores erzielt und somit eine Balance zwischen Modellgenauigkeit und Generalisierungsfähigkeit aufweist.

Basierend auf dieser Evaluierung wird diese Hyperparameter-Kombination für das Training aller Modelle übernommen, da sie in den durchgeführten Tests eine stabile Performance zeigt und das Risiko von Overfitting (Überanpassung an Trainingsdaten) sowie Underfitting (unzureichende Anpassung an Muster in den Trainingsdaten) minimiert. Da die drei Modelle im gleichen Anwendungskontext – der textbasierten Montageanweisungserstellung – eingesetzt werden, ist eine Übertragbarkeit gegeben. Darüber hinaus ist das Fine-Tuning von LLMs mit einem hohen Ressourcenaufwand

verbunden, insbesondere durch tokenbasierte Nutzungskosten und eine zeitintensive Evaluierung mittels Metriken wie BLEU oder METEOR.

Tabelle 6-2: Ergebnis Grid Search zur Auswahl der Hyperparameterkombination am Beispiel des WM-GPT Modells

		Hyperparamter			Validierungsset	
		Batch Size	Learning Rate Multiplier	Number of Epochs	BLEU	METEOR
Kombinationen (Grid)	1	1	0.1	3	5,19%	37,55%
	2	1	0.1	10	19,02%	44,89%
	3	1	2	3	61,46%	75,79%
	4	1	2	10	70,59%	80,46%
	5	1	10	3	72,51%	86,36%
	6	1	10	10	75,47%	87,40%
	7	32	0.1	3	0,00%	17,77%
	8	32	0.1	10	0,00%	17,66%
	9	32	2	3	0,00%	11,95%
	10	32	2	10	13,92%	39,64%
	11	32	10	3	4,95%	30,73%
	12	32	10	10	63,80%	77,41%

Die abschließende Bewertung der drei feinabgestimmten GPT-Modelle an den jeweiligen Testsets im Hinblick auf die Generalisierungsfähigkeit wird in Kapitel 7.1.1 im Rahmen der Evaluierung des AIG durchgeführt.

6.3.3 Prompt-Engineering

Die Kommunikation zwischen Benutzer (Montageprozessplaner) und LLM (GPT-4o), erfolgt über interaktive Eingabeaufforderungen, die durch Schaltflächen und Dropdown-Menüs im AIG bereitgestellt werden. Hinter diesen Benutzerelementen stehen vordefinierte Prompts, die die Interaktion mit den GPT-Modellen strukturieren und eine gezielte Generierung von Outputs ermöglichen. Dabei hängt die Qualität der mit dem LLM generierten Inhalte (auch in Bezug auf die feinabgestimmten Modelle) maßgeblich von der Struktur und Gestaltung des verwendeten Prompts ab. Für die im AIG implementierten Anwendungsfälle, wie in Abbildung 6-13 gezeigt, werden die Prompts iterativ erstellt und basieren auf einer schrittweisen Optimierung und Evaluierung, um eine bestmögliche Performance in den jeweiligen Anwendungsbereichen zu erreichen.

Dabei werden verschiedene Prompting-Techniken verwendet, die gezielt kombiniert werden, um die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendungsdomäne optimal zu erfüllen. Der Einsatz und die Kombination verschiedener Prompting-Techniken wird beispielhaft anhand des in Abbildung 6-16 dargestellten Prompts zur Generierung von Montageanweisungen verdeutlicht.

Die Wortwahl in Prompts kann das Verhalten eines LLM beeinflussen. Bereits kleine Änderungen, wie das Hinzufügen oder Entfernen einzelner Wörter, können die

Interpretation einer Aufgabe durch das Modell erheblich verändern. Dies führt entweder zu unerwünschten oder irrelevanten Antworten oder – bei optimaler Gestaltung – zu präzisen und erwünschten Ergebnissen. [OZDE24, S. 95] Um solche Ergebnisse zu erzielen, wird häufig mit sogenannten „Personas“ gearbeitet. Dabei wird dem Modell ein spezifischer Stil, eine Perspektive oder eine Rolle vorgegeben, z. B. durch Themen, Genres oder fiktive Charaktere, um zielgerichtete und konsistente Antworten zu erhalten. [OZDE24, S. 95–96]

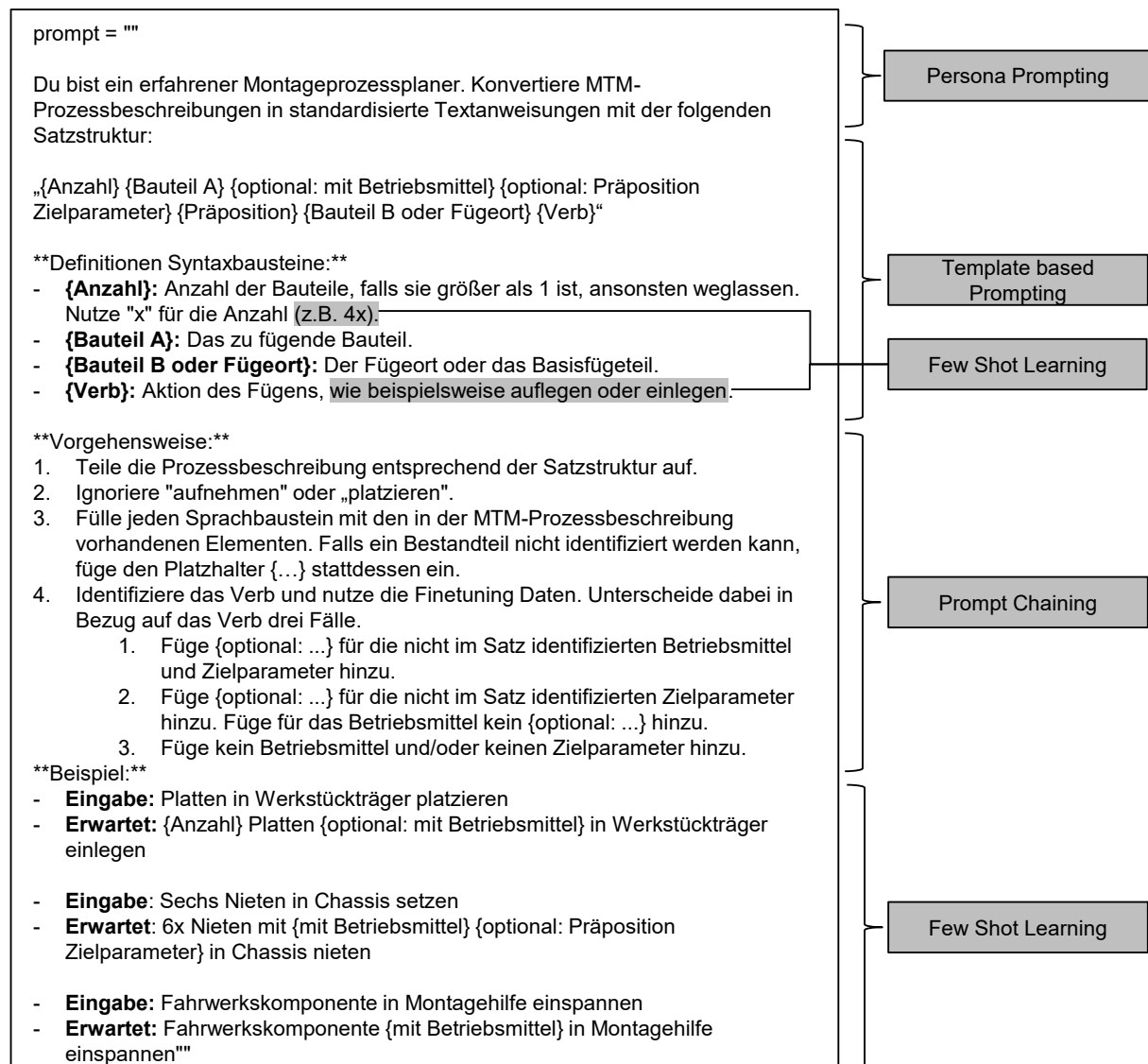


Abbildung 6-16: Aufbau Prompt und eingesetzte Prompting Techniken zur Generierung von Montageanweisungen

Eine weitere Methode zur Verbesserung der Modellleistung ist das Template-Based Prompting. Hierbei werden Vorlagen mit festen Satzstrukturen und Platzhaltern verwendet. Diese Methode sorgt für konsistente und strukturierte Antworten und eignet sich besonders für standardisierte Aufgaben. Ein weiteres nützliches Verfahren ist das Prompt Chaining. Dabei wird die Ausgabe eines LLMs als Eingabe für dasselbe (oder

ein anderes Modell) genutzt, um komplexe oder mehrstufige Aufgaben zu lösen. Diese Technik erlaubt es, iterative Prozesse zu gestalten und die Funktionalität eines einzelnen Modells optimal auszuschöpfen, um Ergebnisse zu erzielen, die in einem einzigen Schritt nicht erreichbar wären. [OZDE24, S. 149]

Für komplexere Aufgaben, die ein tieferes Verständnis des Kontextes erfordern, wird häufig Few-Shot Learning eingesetzt. Hierbei werden dem Modell wenige Beispiele der jeweiligen Aufgabe gegeben, um die Nuancen und den Kontext besser zu verstehen. Diese Technik ist besonders zielführend, wenn es sich um eine spezifische Syntax oder Fachsprache handelt und wird häufig in spezialisierten Domänen angewandt. [OZDE24, S. 92–93]

Die in der Interaktion des AIG mit den GPT-Modellen verwendeten Prompting-Techniken für die Generierung von Entnahmeoperationen, Warnungen, Fehlermeldungen, Übersetzungen sowie Entnahmeoperationen sind in Tabelle 6-3 aufgeführt.

Tabelle 6-3: Übersicht eingesetzte Prompting-Techniken im AIG

Verwendungszweck	GPT-Variante		Prompting-Techniken			
	Feinabgestimmtes GPT-4o	Standard GPT-4o	Persona based Prompting	Template Based Prompting	Few Shot Learning	Prompt Chaining
Montageanweisungstext	X		X	X	X	X
Warnungstext	X		X		X	X
Fehlermeldungstext	X		X		X	X
Übersetzungen Text		X				X
Entnahmeoperationen		X	X	X	X	X

Die Kombination verschiedener Prompting-Techniken ermöglicht es, die Stärken der einzelnen Methoden gezielt zu nutzen und ihre Schwächen auszugleichen. Beispielsweise liefert Persona Prompting den notwendigen Kontext, während Template-Based Prompting für eine klare Struktur sorgt. In komplexen Anwendungsfällen, wie der Generierung von Montageanweisungen, Warnungen oder Fehlermeldungen, führt die Kombination der Techniken zu präziseren und konsistenteren Ergebnissen. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Flexibilität und Genauigkeit der Modelle zu optimieren, indem sowohl der Kontext als auch die Spezifikation der Aufgabe berücksichtigt werden.

6.3.4 Grafische Benutzeroberfläche

Als Schnittstelle zwischen dem System und dem Benutzer (Montageprozessplaner) aus der Arbeitsvorbereitung, dient ein intuitiv gestaltetes GUI. Das in Abbildung 6-17 dargestellte Startfenster des AIG bietet ein Auswahlmenü mit verschiedenen Optionen zur Verwaltung und Bearbeitung von Workflows. Ein Workflow im Kontext des AIG bezeichnet eine spezifische Sequenz von Montageprozessen bzw. die dazugehörigen Montageanweisungen eines bestimmten Produkts oder einer bestimmten Produktvariante. Ein Workflow ist im JSON-Format als Datei speicherbar und kann im AIG bearbeitet und angepasst werden. Dadurch wird eine zentrale, editierbare Struktur geschaffen, die alle relevanten Informationen und Anweisungen für die Montage eines Produkts oder seiner Varianten bündelt und eine Anpassung der Anweisungen ermöglicht.

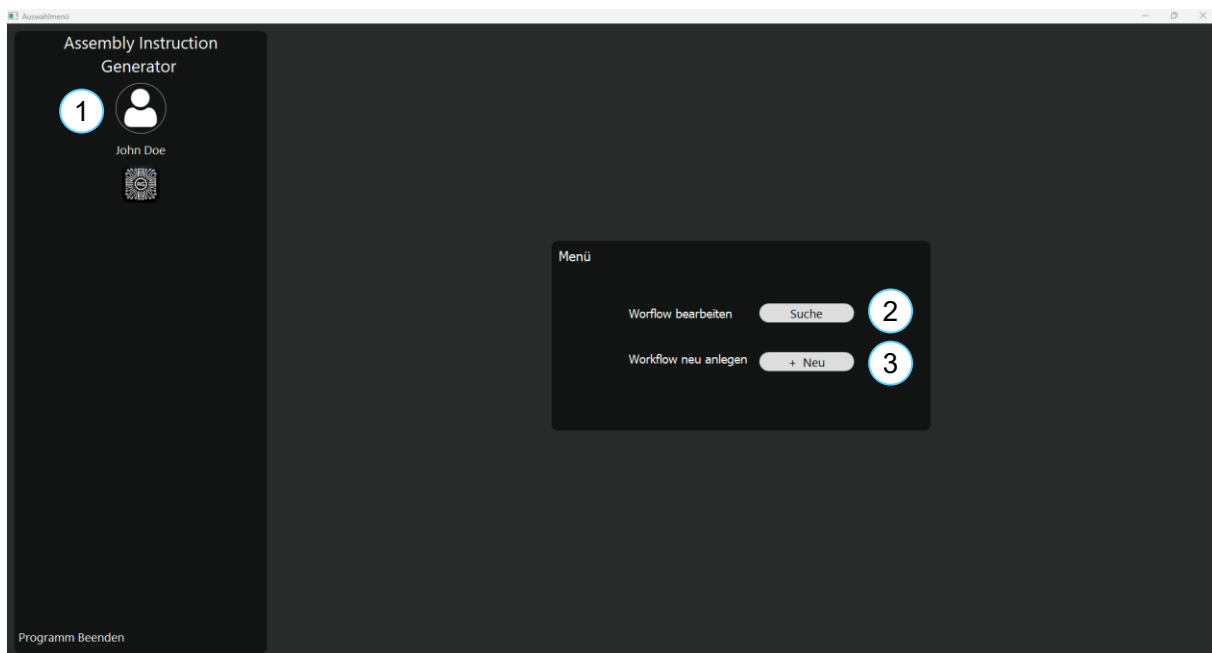


Abbildung 6-17: Startfenster Assembly Instruction Generator

In der linken oberen Ecke des Startfensters wird der aktuelle Benutzer angezeigt (1), was insbesondere in einer Mehrbenutzerumgebung, wie sie in der Arbeitsvorbereitung üblich ist, der Wahrung des Benutzerkontextes dient. Zentrales Element des Fensters ist das Menü, das die wesentlichen Funktionen des Programms zur Auswahl stellt. Über die Option „Workflow bearbeiten“ (2) kann eine JSON-Datei ausgewählt werden, um einen bestehenden Workflow zu öffnen und weiter zu bearbeiten. Diese Funktion ermöglicht es, an bestehenden Projekten weiterzuarbeiten oder Anpassungen vorzunehmen, ohne den Workflow jedes Mal von Grund auf neu erstellen zu müssen.

Mit der Option „Workflow neu anlegen“ (3) kann der Benutzer einen neuen Workflow erstellen, indem er ein Kontextmenü öffnet und eine MTM-Analyse oder einen tabellarischen Montagevorranggraphen in Form einer Excel-Datei auswählt und importiert. Diese Funktion dient dazu neue Projekte anzulegen.

Wenn eine der vorgestellten Optionen im Menü ausgewählt wurde, gelangt der Nutzer in die nächste und wichtigste Ansicht, den Editor. Das GUI des Editors ist in Abbildung 6-18 dargestellt. Es orientiert sich an der in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Struktur der generierten Montageanweisungen und spiegelt diese wider, um dem Montageprozessplaner bereits während der Erstellung eine möglichst genaue Vorstellung von der endgültigen Gestalt der Montageanweisung zu geben.

Im linken Bereich der GUI werden unter „Montagesequenz“ alle identifizierten Montageoperationen aus einer vorhandenen Exceldatei (MTM-Analyse oder tabellarischer Montagevorrangraph) in chronologischer Reihenfolge angezeigt und dabei stets in Zehnerschritten durchnummeriert (1). Diese Reihenfolge kann bei Bedarf vom Montageprozessplaner per Drag & Drop angepasst werden, um eventuelle Fehler in der automatischen Sequenzierung zu korrigieren. Außerdem besteht die Möglichkeit, manuell neue Operationen hinzuzufügen, zu ergänzen bzw. überflüssige Montageoperationen zu löschen.

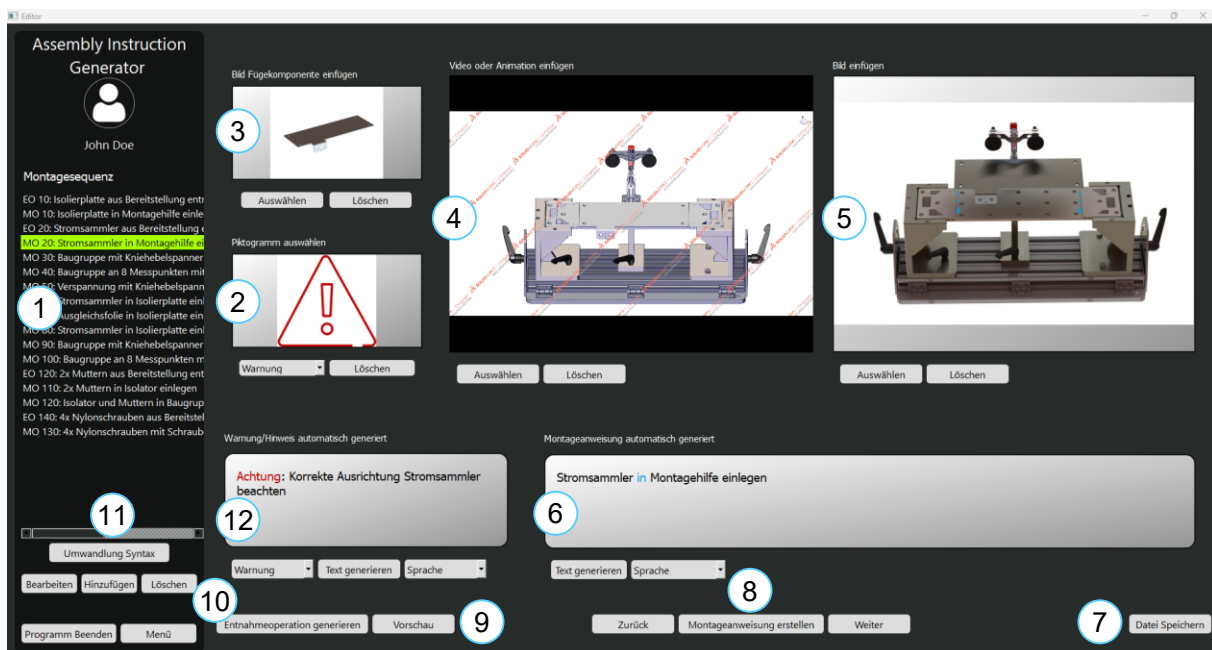


Abbildung 6-18: Editor Assembly Instruction Generator

Im Bereich rechts, oberhalb der Montagesequenz, befindet sich ein Fenster, in das Bilder der zu montierenden/hinzukommenden Fügekomponente geladen werden können (3). Dies kann z. B. ein CAD-Rendering oder ein reales Bild des zu montierenden Bauteils sein. Direkt darunter befindet sich ein Feld, in dem über ein Dropdown-Menü Piktogramme wie ein Warndreieck, Hinweispfeil, Stoppschild oder Hitzesymbol ausgewählt werden können (2). Je nach Montageoperation können sie gezielt eingesetzt und in die Montageanweisung integriert werden, um auf wichtige prozessbezogene Warnungen oder Fehlermeldungen aufmerksam zu machen.

In der Mitte rechts neben dem Fenster mit den Fügekomponenten befindet sich ein Feld, in das Animationen oder Videos der Fügeoperation geladen werden können (4). Diese Inhalte, die entweder mit CAD-Programmen erstellt werden oder reale Videos darstellen, werden speziell für Anweisungen der Kompetenzstufe I benötigt. Rechts oben ist ein weiteres Fenster platziert, in das Bilder der Fügeoperation importiert werden können (5). Auch hier kann der Montageprozessplaner zwischen CAD-Renderings und realen Bildern wählen, um den jeweiligen Montageschritt anschaulich darzustellen.

Unterhalb des Bereichs für Bilder, Animationen und Piktogramme befinden sich die Felder für die Textanweisungen. Die automatische Umwandlung aller extrahierten Montageoperationen unter (1) in die standardisierte Syntax wird durch die Betätigung der Schaltfläche „Umwandlung Syntax“ gestartet (11). Die hierdurch automatisch generierten Textanweisungen werden auf der rechten Seite unterhalb angezeigt (6).

Darunter ist ein Dropdown-Menü angeordnet, mit dem die Anweisungstexte in verschiedene Sprachen (Englisch, Französisch und Spanisch) übersetzt werden können. Links daneben ist ein Fenster für Warnungen und Fehlermeldungen platziert (12), das ebenfalls mit einem Dropdown-Menü verknüpft ist, um zwischen Warnungs- und Fehlermeldungstexten zu wechseln. Auch hier ermöglicht ein Dropdown-Menü die Übersetzung der Warnungen und Fehlermeldungen in andere Sprachen. Mit der Schaltfläche „Text generieren“ wird ein Warnungs- und Fehlermeldungstext erzeugt. Über ein Dropdown-Menü kann anschließend ausgewählt werden, welcher der beiden Texte angezeigt wird. Bei Bedarf können die Texte manuell angepasst werden, um sicherzustellen, dass alle relevanten Sicherheitsaspekte für den Werker klar und prägnant dargestellt sind.

Am unteren Rand der GUI befinden sich die Bedienelemente, die eine einfache Navigation und Verwaltung der einzelnen Montageoperationen ermöglichen. Am rechten Rand befindet sich eine Schaltfläche, um den Workflow als JSON-Datei zu speichern (7). Eine weitere Schaltfläche ermöglicht die Erstellung der Montageanweisungen für alle Kompetenzstufen (8). Dabei öffnet sich ein Kontextmenü, in dem abgefragt wird, ob nur die aktuelle oder alle angelegten Montageoperationen generiert werden sollen. Zusätzlich gibt es eine Schaltfläche, mit der die Montageanweisungen in einer Vorschau, wie in Abbildung 6-19 dargestellt, angezeigt werden können (9).

Daneben befindet sich eine Schaltfläche, mit der automatisch die entsprechende Entnahmeoperation zur jeweiligen Fügeoperation generiert werden kann (10). Diese wird der jeweiligen Montageoperation in der Montagesequenz (1) zugeordnet und kann anschließend bearbeitet werden. Dabei werden alle Bilder und Piktogramme übernommen, und aus dem Text der Fügeanweisung wird ein Text für die Entnahmeanweisung generiert.

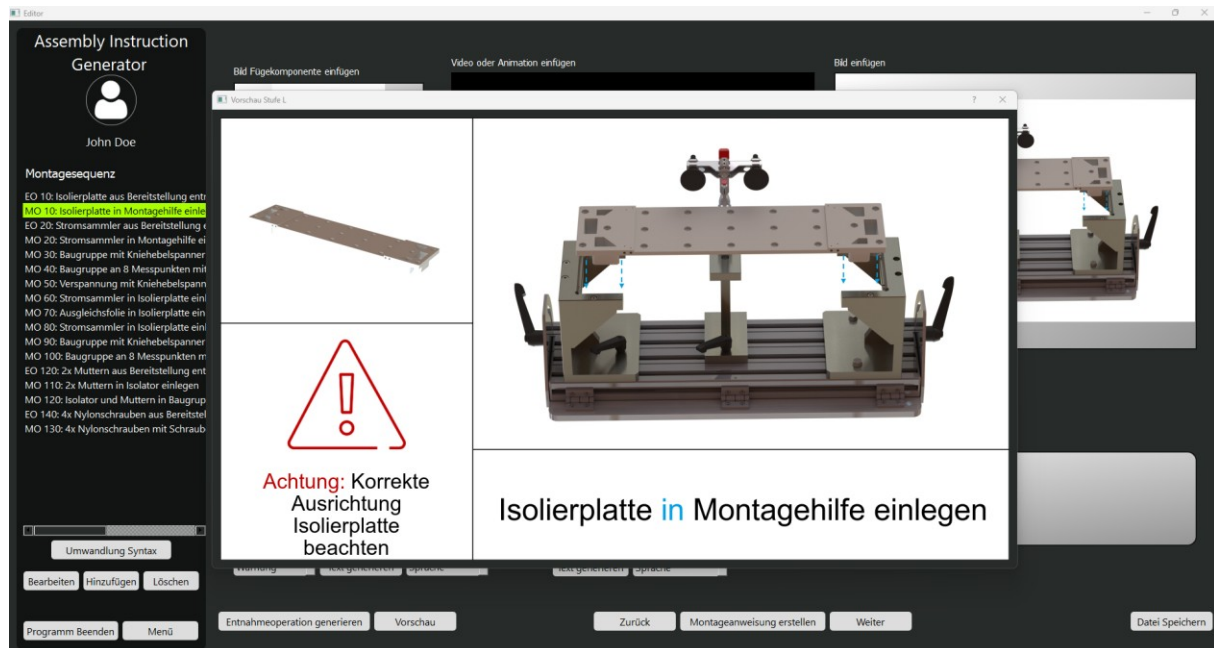


Abbildung 6-19: Vorschauoption Montageanweisung

Der AIG wird als teilautomatisiert bezeichnet, da die Generierung der Textanweisungen, Warnhinweise und Fehlermeldungen zwar vollständig automatisiert durch drei feinabgestimmte GPT-Modelle erfolgt, Bilder, Animationen und fehlende Informations-elemente jedoch gezielt durch den Montageprozessplaner ergänzt werden. Dadurch fließt Expertenwissen in die Anweisungen ein, und es erfolgt eine abschließende inhaltliche Kontrolle der generierten Inhalte. Der AIG ermöglicht die Erstellung von standardisierten Montageanweisungen in vier verschiedenen Kompetenzstufen unter Einbeziehung relevanter Produkt- und Prozessinformationen sowie visueller Darstellungen aus externen Quellen wie CAD-Bildern und Animationen. Die strukturierte und modulare Gestaltung der Benutzeroberfläche soll die effiziente Erstellung, Prüfung und ansprechende Visualisierung der Montageanweisungen unterstützen. Mit der Implementierung des AIG wurde eine Lösung geschaffen, die durch die Kombination von regelbasierten und KI-gestützten Verfahren eine standardisierte, skalierbare und effiziente Generierung von Montageanweisungen ermöglicht.

7 Evaluierung

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Konzepte und deren Umsetzung, wird im Folgenden eine Evaluierung durchgeführt. Diese dient der Eigenschaftsabsicherung im Rahmen des methodischen Vorgehens nach dem V-Modell und erfolgt anhand der Beispielprodukte – Baugruppen eines Brennstoffzellen-Stacks und einer Wasserpumpe für Automobile – sowie des in Kapitel 6 entwickelten Demonstrators. Die Evaluierung umfasst zum einen die Bewertung des AIG hinsichtlich der Qualität der generierten Montageanweisungen, Warnhinweise und Fehlermeldungen sowie der Wirtschaftlichkeit (Kapitel 7.1). Zum anderen wird die Nutzeradaptivität in Verbindung mit dem Kompetenzstufenmodell und dem Recommender-System im Rahmen einer Probandenstudie hinsichtlich Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit untersucht (Kapitel 7.2). Dieses Kapitel stellt den zentralen Teil der Evaluation dar, da es das Gesamtsystem unter realitätsnahen Bedingungen validiert und damit den empirischen Kern der Dissertation bildet. Abschließend erfolgt eine Reflexion, in der die Evaluierungsergebnisse mit den definierten Anforderungen sowie den Forschungsfragen abgeglichen und diskutiert werden (Kapitel 7.3).

7.1 Evaluierung des Assembly Instruction Generator

In diesem Kapitel wird die Evaluierung des AIG beschrieben, wobei die Modellbewertung der feinabgestimmten GPT-Modelle hinsichtlich der Qualität der generierten Montageanweisungen und die Effizienzsteigerung sowie die Wirtschaftlichkeit der Montageanweisungserstellung untersucht werden. Teile dieses Kapitels sind aus KELM ET AL. entlehnt [KELM25c].

7.1.1 Bewertung der Generalisierungsfähigkeit der feinabgestimmten GPT-Modelle

Zur Evaluierung des AIG wird eine Modellbewertung durchgeführt, um die Qualität der generierten Montageanweisungen, Warnhinweise und Fehlermeldungen zu analysieren. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe der BLEU- und METEOR-Scores, die die syntaktische und semantische Übereinstimmung zwischen den generierten Texten und den Referenztexten messen [PAPI02; BANE05]. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der Generalisierungsfähigkeit der drei feinabgestimmten Modelle (MA-, WM- und FM-GPT), um zu beurteilen, inwieweit das erlernte Wissen auf neue, unbekannte Prozesse bzw. Produkte übertragbar ist. Die Generalisierungsfähigkeit stellt sicher, dass das Modell nicht nur auf den Trainingsdaten, sondern auch auf unbekannten Daten präzise und konsistente Montageanweisungen generiert.

Zur Bewertung der drei feinabgestimmten Modelle werden diese mit dem Basismodell GPT-4o verglichen. Sowohl die feinabgestimmten Modelle als auch das Basismodell erhalten identische Prompts für ihr jeweiliges Gebiet. Die Bewertung erfolgt anhand

des bereits in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Testdatensatzes, der jeweils mehrere Beispiele für die 48 verschiedenen Montageprozesse aus Tabelle C-2 umfasst. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die Prozesse zur Montage der Kopf- und Basisbaugruppe eines Brennstoffzellen-Stacks sowie einer Wasserpumpe für Automobile, die in Abbildung 7-1 dargestellt sind.

Durch die Auswahl von zwei unterschiedlichen Produkten wird die Generalisierungsfähigkeit der Modelle besser getestet, da die Prozesse nicht nur unterschiedliche Baugruppen eines Produkts, sondern zwei unabhängige Anwendungsbereiche umfassen. Die Montageprozesse decken ein breites Spektrum typischer manueller Tätigkeiten ab, darunter Einlegen, Auflegen, Einschrauben, Messen, Einspannen und Scannen.

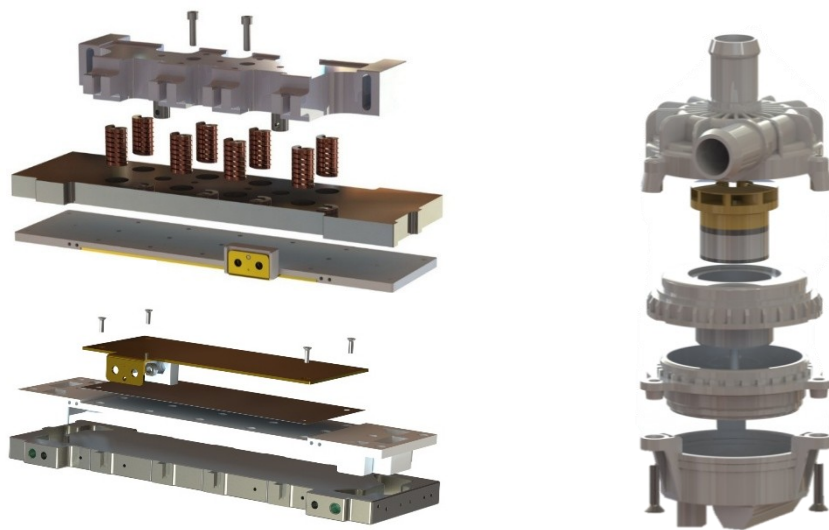


Abbildung 7-1: Produkte der Testdatensätze – Kopf- und Basisbaugruppe Brennstoffzellen-Stack (links) und Wasserpumpe (rechts)

Um Schwankungen zu minimieren, wird jedes Modell fünfmal mit dem gleichen Testdatensatz getestet. Der MW der BLEU- und METEOR-Scores dient als Grundlage für die abschließende Bewertung, um eine zuverlässige Einschätzung zu gewährleisten. Abbildung 7-2 zeigt die BLEU- und METEOR-Scores der Baseline (BL) und der feinabgestimmten GTP-Modelle (FT) für die Bewertung der Generierung der Montageanweisungen (MA), Warnhinweise (WM) und Fehlermeldungen (FM). Die Ergebnisse zeigen erhebliche Leistungsverbesserungen nach dem Fine-Tuning. Die feinabgestimmten Modelle erreichen in beiden Metriken deutlich höhere Werte, was auf eine verbesserte Qualität der generierten Inhalte hinweist.

So hat sich z. B. der BLEU-Score zwischen BL MA und FT MA um den Faktor 7,43 verbessert, während der METEOR-Score eine Verbesserung um den Faktor 3,32 aufweist. Die Verbesserungen des BLEU-Score verdeutlichen, dass die feinabgestimmten Modelle in der Lage sind die Referenzanweisungen syntaktisch genauer nachzubilden als das Baseline Modell. Dies zeigt sich in einer präziseren Übereinstimmung

von Wortwahl und Satzstruktur. Auch die METEOR-Scores der feinabgestimmten Modelle steigen deutlich an, was auf eine bessere semantische Übereinstimmung und grammatikalische Korrektheit der generierten Inhalte hinweist.

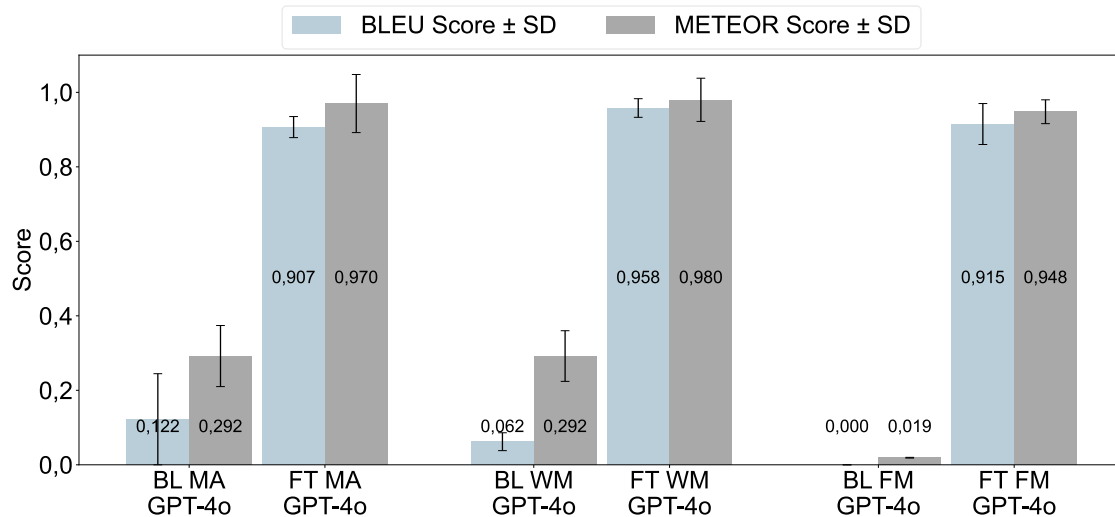


Abbildung 7-2: BLEU- und METEOR-Scores der feinabgestimmten Modelle und Basismodelle im Vergleich

Des Weiteren liegen die BLEU- und METEOR-Scores der feinabgestimmten Modelle durchweg über der oft als qualitativ hochwertig angesehenen Schwelle von 0,7 [LAVI11]. Dies unterstreicht die Fähigkeit der feinabgestimmten Modelle, Inhalte zu generieren, die menschlichen Qualitätsstandards entsprechen.

Diese Ergebnisse zeigen zum einen die Bedeutung des Fine-Tunings für die Leistungsfähigkeit des AIG und verdeutlichen zum anderen die hohe Generalisierungsfähigkeit. Durch das Fine-Tuning mit einer optimalen Trainingsdatensatzgröße und sorgfältig gewählten Hyperparametern gelingt es den Modellen, nicht nur qualitativ hochwertige und praxisrelevante Inhalte zu generieren, sondern dieses Wissen auch auf neue, unbekannte Montageprozesse/Kontexte zu übertragen. Dies zeigt sich insbesondere in der Fähigkeit des AIG, Montageanweisungstexte für verschiedene Montageaufgaben produktunabhängig zu generieren. Die Ergebnisse belegen somit die Eignung des AIG, flexibel auf die Anforderungen unterschiedlicher Szenarien zu reagieren und dabei die Effizienz und Qualität der Montageanweisungserstellung zu steigern.

7.1.2 Wirtschaftlichkeitsbewertung

Um eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des AIG zu ermöglichen, wird auf die statische Investitionsrechnung als Methode zurückgegriffen. Statische Verfahren bieten den Vorteil, dass sie mit relativ geringem Aufwand eine Näherungsrechnung zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Investition ermöglichen. Sie basieren auf Durchschnittswerten und liefern somit eine approximative Einschätzung, die als

Entscheidungsgrundlage dienen kann. Dabei ist zu beachten, dass es sich lediglich um eine Annäherung handelt und nicht die gesamte Dynamik eines Investitionsvorhabens abbildet. [GOET14, S. 55–57]

Die folgenden Berechnungen basieren daher auf der Annahme einer Nutzungsdauer von 10 Jahren. Dieser Zeitraum orientiert sich an der in der „Tabelle der Absetzungen für Abnutzung“ (AfA-Tabelle) des Bundesministeriums der Finanzen typischerweise angesetzten Nutzungsdauer von zehn Jahren für vergleichbare Betriebsmittel im industriellen Umfeld (z. B. Software, Maschinen und Anlagen) [BUND00]. Außerdem erfolgt die Berechnung auf Basis einer repräsentativen Durchschnittsperiode, wobei für die Analyse ein Zeitraum von einem Jahr als maßgeblich betrachtet wird. Die Werte für die Durchschnittsperiode werden aus den Daten der Gesamtnutzungsdauer abgeleitet.

Die statischen Verfahren der Investitionsrechnung können eingesetzt werden, um konkurrierende Investitionsobjekte miteinander zu vergleichen. Im vorliegenden Fall wird jedoch davon ausgegangen, dass bereits ein KAS im Einsatz ist, das eine bestehende Software zur Erstellung von Montageanweisungen beinhaltet. Der AIG muss sich daher nicht im Vergleich zu einer alternativen Anschaffung, sondern gegenüber der bereits eingesetzten Lösung als vorteilhaft erweisen. Dies stellt einen anspruchsvolleren Bewertungsansatz dar, da es sich um die Prüfung der absoluten Vorteilhaftigkeit handelt. Diese liegt vor, wenn die Investition in den AIG der Unterlassungsalternative – also dem Verbleib bei der bestehenden Lösung – vorzuziehen ist. [GOET14, S. 55]

Da eine Wirtschaftlichkeitsaussage unabhängig von einer festgelegten Anzahl an generierten Montageanweisungen getroffen werden soll, wird die Break-Even-Analyse durchgeführt. Die Berechnung ermittelt die Break-Even-Menge, also die Anzahl an Montageanweisungen, ab der die durch den AIG eingesparten Kosten die initialen Investitions- und laufenden Betriebskosten decken und sich die Investition wirtschaftlich rentiert. Wird diese Anzahl an Montageanweisungen jährlich erreicht oder überschritten, übersteigen die Einsparungen die Investitionskosten – ab diesem Punkt ist der wirtschaftliche „Break-even“ erreicht.

Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung des AIG werden zunächst die einmaligen Investitionskosten ermittelt. Diese setzen sich aus den Programmier- und Implementierungskosten sowie den Kosten für das Fine-Tuning der Modelle zusammen. Die Programmier- und Implementierungskosten betragen ca. 5.142 € unter Annahme von 160 benötigten Arbeitsstunden (ca. vier Wochen Vollzeit) bei einem durchschnittlichen Bruttostundenlohn von 32,14 €/h für einen Programmierer in Deutschland. Der Bruttostundenlohn wurde auf Basis eines monatlichen Arbeitgeberbruttogehalts eines Programmierers von 4.600 € [HANS24] unter Berücksichtigung eines Faktors von 1,21 [FUER25] für die Arbeitgeberanteile berechnet ($4.600 \text{ €} \times 1,21 / (40 \times 4,33 \text{ Wochen pro Monat})$). Zusätzlich fallen Kosten für das Fine-Tuning der Modelle an. Diese Kosten belaufen sich auf insgesamt 150 €; 30 € für das MA-Modell, 80 € für das WM-

Modell und 40 € für das FM-Modell. Diese Kosten ergeben sich aus dem Tokenverbrauch während des Trainingsprozesses.

Auf dieser Grundlage lassen sich die in Tabelle 7-1 dargestellten jährlichen Kosten ableiten. Für die Bewertung wird, wie bereits beschrieben, eine Nutzungsdauer von 10 Jahren sowie ein kalkulatorischer Zinssatz von 6 % gemäß GOETZE angenommen [GOET14, S. 65]. Neben den Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen fallen während der Nutzungsdauer variable Kosten an, die durch die Generierung von Montageanweisungen mit den feinabgestimmten Modellen entstehen. Diese Kosten ergeben sich durch die Nutzung der OpenAI-API und werden durch die Anzahl der Input- und Output-Token pro Generierung bestimmt. Sie hängen direkt von der Nutzungshäufigkeit des AIG sowie der Länge der Prompts und generierten Ausgaben ab und betragen durchschnittlich 0,01 € pro Montageanweisung (basierend auf den GPT-4o-Modellen).

Tabelle 7-1: Wirtschaftlichkeitsrechnung

Einmalige Investitionskosten			
Programmierkosten		5.142,40	€
Fine Tuning GPT		150,00	€
Gesamtinvestition	I	5.292,40	€

Jährliche Kosten			
Nutzungsdauer (n)		10	Jahre
Abschreibungen (A)	$A = I / n$	529,24	€/a
Kalkulatorischer Zinssatz (i)		6	%
Kalkulatorische Zinsen (Z)	$Z = (I / 2) * i$	158,77	€/a
Fixe Kosten (K_f)	$K_f = A + Z$	688,01	€/a
Variable Kosten pro Anweisung (k_v)		0,01	€/Anweisung

Jährliche Nutzeffekte			
Zeitersparnis pro Anweisung (T_s)		0,05	h
Personalkosten (P)		38,72	€/h
Preis pro Anweisung (p)	$p = T_s * P$	1,94	€/Anweisung

Ergebnis			
Break Even Point	$B = K_f / (p - k_v)$	357,22	Anweisungen/a

Die durch die Nutzung des AIG resultierenden Effizienzvorteile bei der Erstellung von Montageanweisungen müssen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung ebenfalls quantifiziert werden. Dazu wird ein Versuch durchgeführt. Die hierbei verwendete MTM-Analyse umfasst fünf unterschiedliche Prozessbeschreibungen, die verschiedene Montageprozesse wie das Einlegen, Einschrauben, Scannen, Vermessen und Ineinanderschieben abbilden. Fünf Personen – ohne Vorerfahrung in der Erstellung von Montageanweisungen – mit ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund übernehmen

die Rolle von Montageprozessplanern und erstellen jeweils fünf Montageanweisungen auf zwei unterschiedliche Arten:

1. Zunächst erfolgt die manuelle Erstellung mit Hilfe einer vorgegebenen Power-Point-Maske. In dieser müssen fünf Montageanweisungen aus der MTM-Analyse abgeleitet, die zugehörigen Texte, Warnungen sowie Fehlermeldungen für die vier Kompetenzstufen eigenständig formuliert, in die entsprechenden Felder der Maske eingetragen und mit korrekter chronologischer Bezeichnung gespeichert werden. Diese Vorgehensweise entspricht – wie in den Grundlagen und im Stand der Forschung dargestellt – der aktuell gängigen Praxis zur Montageanweisungserstellung mit manuellen Editorprogrammen.
2. Anschließend erfolgt die Erstellung von fünf Montageanweisungen mit Hilfe des AIG auf Basis derselben MTM-Analyse.

Während des gesamten Prozesses wird jeweils die benötigte Zeit gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle E-1 in Anhang E dargestellt und zeigen, dass der Einsatz des AIG im Durchschnitt zu einer Zeitersparnis von ca. 3 Minuten pro Montageanweisung (ca. 71,8 %) führt. Zur Berechnung des wirtschaftlichen Vorteils wird der durchschnittliche Stundenlohn eines Montageprozessplaners mit dem ermittelten Zeitvorteil multipliziert. Daraus ergibt sich die Kostenersparnis pro generierter Montageanweisung, die in der klassischen Investitionsrechnung dem Preis pro Stück entspricht. Bei einem angenommenen Bruttomonatslohn von 4.850 € [STEP24] ergibt sich ein Arbeitgeberbrutto von 38,72 €/h ($(4.850 \text{ €} \times 1,21 / (35 \times 4,33 \text{ Wochen pro Monat}))$).

Die Berechnung der Break-Even-Menge ergibt, dass der Einsatz des AIG ab 358 Montageanweisungen pro Jahr wirtschaftlich sinnvoll ist. Das bedeutet, dass Unternehmen, die diese Anzahl an Anweisungen pro Jahr überschreiten, durch den Einsatz des AIG Kosteneinsparungen erzielen, die die Investitions- und Betriebskosten übersteigen. Je höher die Anzahl der erstellten Montageanweisungen ist, desto größer ist der wirtschaftliche Vorteil. Insbesondere in einem dynamischen Umfeld mit einer hohen Anzahl an Produktvarianten und manuellen Montageprozessen zeigt sich das wirtschaftliche Potenzial des AIG. Betrachtet man beispielsweise ein Szenario mit drei Montagestationen mit integrierten KAS, an denen jeweils sieben manuelle Montageprozesse für zehn verschiedene Produkte mit jeweils drei Varianten durchgeführt werden, ergibt sich bereits eine jährliche Anzahl von 630 Montageanweisungen, die durch die Arbeitsvorbereitung erstellt werden müssen. Dies entspricht nahezu dem Doppelten der Break-even-Menge. In derartigen Fällen – insbesondere bei regelmäßig wechselnden Produkten – wird der wirtschaftliche Nutzen des AIG besonders deutlich, da die Effizienz bei der Erstellung und Anpassung von Montageanweisungen erheblich gesteigert wird.

7.1.3 Diskussion

Die Evaluierung des AIG zeigt, dass die teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führt. Der Zeitgewinn resultiert nicht nur aus der automatisierten Generierung der Anweisungstexte, sondern auch aus der strukturierten Ablage, Chronologisierung und standardisierten Benennung der generierten Inhalte für alle Kompetenzstufen in einem Arbeitsschritt. Dies gewährleistet eine konsistente Bereitstellung der Anweisungen und eine fehlerfreie Abrufbarkeit durch das KAS.

Trotz der positiven Ergebnisse bestehen jedoch einige Limitationen, die die Übertragbarkeit und den praktischen Einsatz des AIG beeinflussen können:

- **Eingeschränkte Berücksichtigung visueller Inhalte:** Der AIG bzw. die Evaluierung konzentriert sich auf die Generierung von Textanweisungen, Warnungen und Fehlermeldungen. Die Erstellung von unterstützenden visuellen Inhalten wie Bildern und Videos wurde nicht explizit betrachtet, obwohl diese wichtig für eine praxisnahe Montageanweisungserstellung sind. Eine Erweiterung des AIG um automatisierte Bild- und Videoerzeugung könnte den Nutzen weiter steigern.
- **Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Trainingsdaten:** Die Qualität der generierten Montageanweisungen hängt maßgeblich von der Breite und Tiefe der Trainingsdaten ab. Die Evaluierung basiert auf einer begrenzten Menge an standardisierten Montageprozessen. Besonders gut funktioniert das Modell für Montageprozesse wie Einlegen, Auflegen, Schraub- und Nietprozesse, da diese während des Fine-Tunings besonders gut konditioniert wurden. Eine zukünftige Erweiterung der Trainingsdaten könnte die Modellrobustheit weiter erhöhen.
- **Einsatz von MTM-Analysen und mögliche Erweiterungen:** Der AIG wurde für die Verarbeitung von MTM-2 und MTM-UAS optimiert. Eine Anpassung des AIG zur Nutzung von MTM-1 würde die Anwendungsbreite für die teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen vergrößern.
- **Datenhoheit und zentrale Bereitstellung als kritischer Faktor:** Die Nutzung eines extern gehosteten GPT-Modells über eine API-Schnittstelle bringt Datenschutz- und Sicherheitsfragen mit sich. In vielen Industrieunternehmen hat der Schutz sensibler Produktionsdaten einen hohen Stellenwert, sodass eine externe Datenverarbeitung problematisch sein könnte. Dies könnte die Akzeptanz und den praktischen Einsatz des AIG in bestimmten Unternehmenskontexten einschränken und erfordert möglicherweise alternative Lösungen wie On-Premise-Modelle (lokal betriebene Systeme ohne externe Datenübertragung) oder Closed-Loop-Systeme (vollständig interne Datenverarbeitung) innerhalb der Unternehmensinfrastruktur, was jedoch mit zusätzlichem Investitionsaufwand verbunden ist.

7.2 Evaluierung des Kompetenzstufenmodells zur Nutzeradaptivität

In diesem Kapitel wird das Kompetenzstufenmodell zur Nutzeradaptivität evaluiert. Die grundsätzliche Vorteilhaftigkeit von KAS und In-situ-Projektionen wird dabei nicht erneut untersucht, da sie bereits in verschiedenen Arbeiten umfassend nachgewiesen wurde [FUNK15b; FUNK16; MENG18; KELL21; PFEI22]. Das entwickelte nutzeradaptive KAS bzw. das zugrundeliegende Kompetenzstufenmodell erfordert eine spezifische Analyse der Mensch-System-Interaktion nach der entsprechenden Norm DIN EN ISO 9241-11. Diese definiert Usability („Gebrauchstauglichkeit“ bzw. „Benutzerfreundlichkeit“) als den Grad, in dem ein technisches System effektiv, effizient und zufriedenstellend genutzt werden kann [DIN18b]. Zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit des Modells wird eine Probandenstudie durchgeführt. Das Ziel der Studie besteht darin, das entwickelte Kompetenzstufenmodell zu evaluieren, indem die Sinnhaftigkeit der Schwellwerte für den Wechsel zwischen den Kompetenzstufen sowie die allgemeine Gebrauchstauglichkeit und Technologieakzeptanz des KAS in Verbindung mit dem Recommender-System untersucht werden. Aus den Ergebnissen sollen praxisrelevante Erkenntnisse abgeleitet werden. Das Kapitel beruht im Wesentlichen auf KELM ET AL. [KELM25b].

7.2.1 Methodik

Das Studiendesign sieht vor, dass die Probanden unter Laborbedingungen eine Montageaufgabe durchführen, bei der sie zehn aufeinanderfolgende Montageprozesse an einer manuellen Vormontagestation (Demonstrator aus Kapitel 6.1) durchführen. Jeder Proband montiert das Produkt (Basisbaugruppe Brennstoffzellen-Stack) mit Unterstützung des KAS neunmal hintereinander. Die Anzahl der Durchgänge wurde so gewählt, dass die Versuchsdauer pro Proband auf maximal eine Stunde begrenzt ist und zugleich die höchste Kompetenzstufe (O) bei entsprechender Leistung erreichbar bleibt.

Es werden sowohl objektive als auch subjektive Evaluierungsmethoden eingesetzt. Die objektiven Methoden umfassen die Messung der Zeit pro Durchgang, der Anzahl der Fehler pro Durchgang und der Anzahl der Durchgänge, die erforderlich sind, um eine neue Kompetenzstufe zu erreichen.

Die subjektiven Methoden umfassen quantitative und qualitative Ansätze zur Bewertung der Wahrnehmung und Akzeptanz des Systems. Als quantitatives Instrument wird nach dem ersten Durchgang sowie vor und nach jedem Stufenwechsel der NASA Raw Task Load Index (NASA-RTLX) eingesetzt, um die kognitive Beanspruchung an den Schwellwerten zu erfassen. Am Ende der Probandenstudie füllen die Probanden einen Fragebogen aus, der den „System Usability Scale“ (SUS) zur Erfassung der Gebrauchstauglichkeit, das „Technology Acceptance Model“ (TAM) zur Erfassung der Technologieakzeptanz und vier selbst formulierte geschlossene Fragen zur Wahrnehmung der Schwellwerte umfasst.

Zur Ergänzung der quantitativen Methoden wird nach dem letzten Durchgang ein unstrukturiertes Kurzinterview mit den Probanden durchgeführt. Mit diesen qualitativen Instrumenten werden die subjektiven Erfahrungen der Teilnehmer hinsichtlich der Wahrnehmung des Kompetenzstufenmodells und der Reduzierung der Anweisungstiefe des KAS erfasst. Die Kombination dieser Ansätze ermöglicht eine holistische Evaluierung der Schwellwerte und des KAS sowie Einblicke in die individuelle Wahrnehmung und das Benutzererlebnis. Das Studiendesign ist in Abbildung 7-3 zusammenfassend dargestellt.

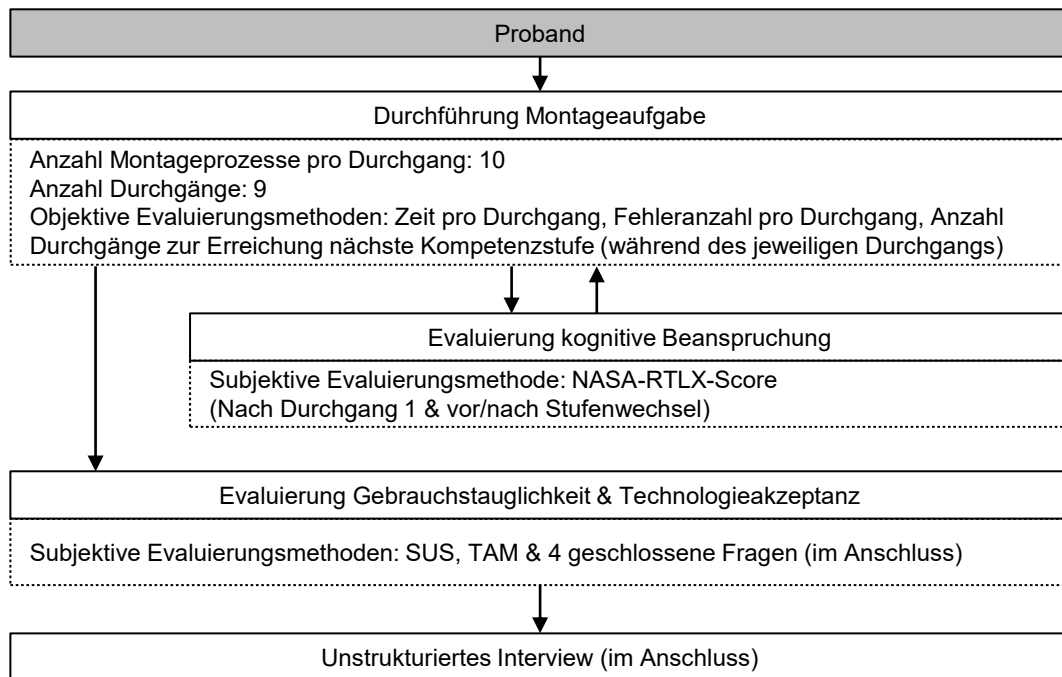


Abbildung 7-3: Übersicht Studiendesign

Probanden

An der Studie nehmen 15 Probanden teil, die entweder am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) oder an der Universität des Saarlandes beschäftigt sind oder aus deren Umfeld stammen. Die Probanden sind mit dem zu montierenden Produkt und den spezifischen Montageprozessen nicht vertraut. Die überwiegende Mehrheit verfügt jedoch über einen technischen Hintergrund, so dass eine grundsätzliche Affinität zur Montage vorhanden ist.

Versuchsaufbau

Die Laborstudie wird an der in Kapitel 6.1 beschriebenen Vormontagestation durchgeführt. Das Recommender-System fungiert als zentrale Mensch-Maschine-Schnittstelle und kommuniziert über den Touchscreen Vorschläge zum Stufenwechsel. Wie in Abbildung 7-4 dargestellt, projiziert das KAS die Montageanweisungen mit Hilfe des Beamer auf die Arbeitsfläche links neben der Montagehilfe, in der das Produkt montiert wird. Zusätzlich werden mit einem Laserprojektor Konturen, Messpunkte und

Schraubpunkte In-situ auf das zu montierende Objekt projiziert. Der Laserprojektor übernimmt zudem die Funktion eines Pick-by-Light-Systems, indem er die entsprechende Materialbox in der hinter der Montagehilfe befindlichen Materialbereitstellung markiert.

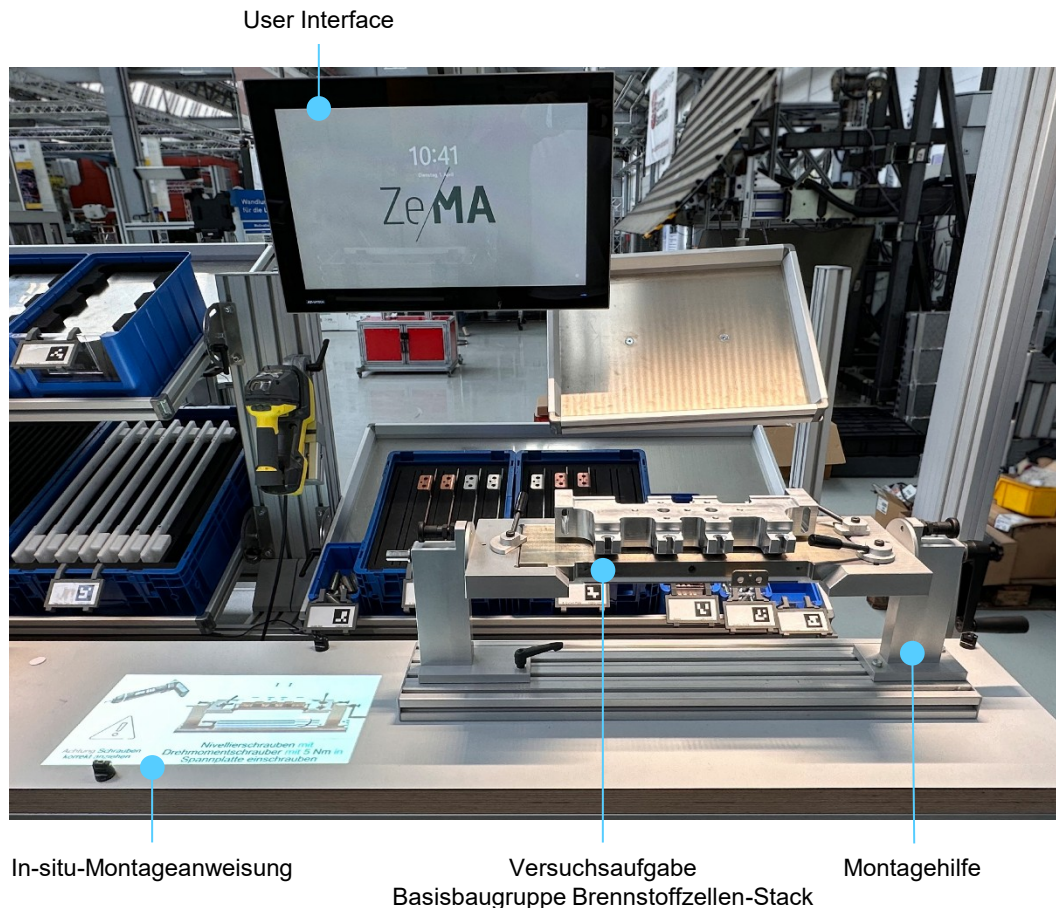


Abbildung 7-4: Versuchsaufbau

Versuchsaufgabe

Die Versuchsaufgabe besteht in der Montage der Basisbaugruppe des Brennstoffzellen-Stacks (vgl. Abbildung 6-1 in Kapitel 6.1) aus dem Forschungsprojekt H2Ska-ProMo. Sie umfasst, wie bereits erwähnt, zehn sukzessiv durchzuführende Prozesse:

- Ein- und Ausspannen der Basis-Endplatte in die Montagehilfe
- Drehen/Schwenken der Montagehilfe (2x)
- Scannen der Basis-Endplatte
- Ein- und Auflegen von acht Federn, der Spannplatte und der Stromsammelgruppe
- Verschrauben von zwei M8-Schrauben mit einem manuellen Drehmomentschrauber
- Verschrauben von vier Nylonschrauben mit einem herkömmlichen Schraubendreher

Die Montageprozesse und das zu montierende Produkt werden so gewählt, dass sie möglichst repräsentativ für die manuellen Montage sind. Die Prozessfolge ist in Abbildung 7-5 dargestellt.

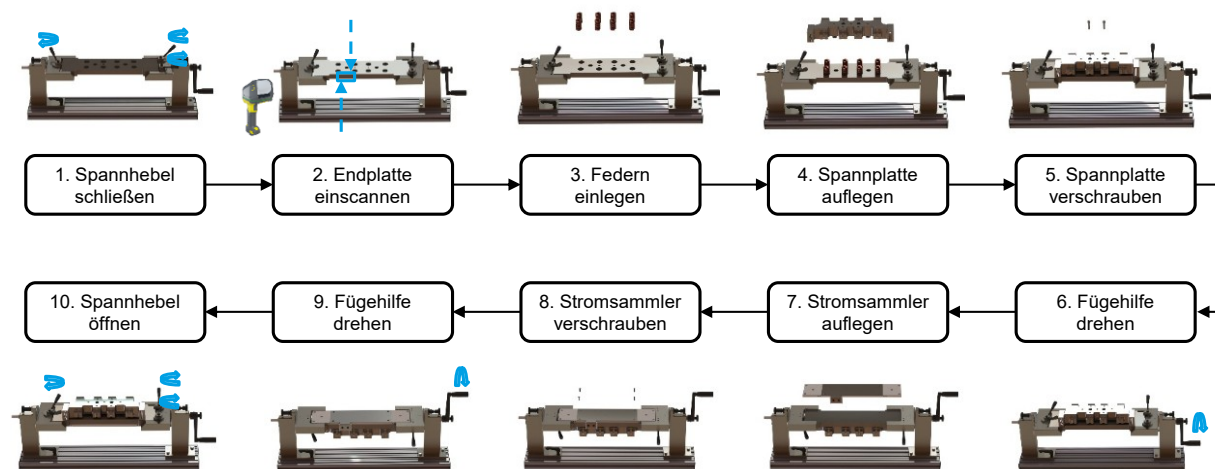


Abbildung 7-5: Prozessablauf Versuchsaufgabe

Evaluationsmethoden

Zur Messung der kognitiven Beanspruchung der Probanden wird der NASA-RTLX eingesetzt [HART06]. Dieses Verfahren erfasst die kognitive Beanspruchung der Probanden in sechs Dimensionen: mentale, körperliche und zeitliche Beanspruchung, Aufgabenerfüllung, Anstrengung und Frustration. Die Beanspruchung wird für jede Dimension auf einer Skala von 0 bis 20 bewertet (siehe Abbildung E-1 im Anhang E). In der klassischen Variante des NASA-TLX werden die Dimensionen paarweise einander gegenübergestellt und nach ihrer subjektiven Bedeutung gewichtet [HART88]. In der vorliegenden Dissertation wird die Variante NASA-RTLX genutzt, die keine Gewichtung enthält, da alle Dimensionen gleichbedeutend in die Bewertung eingehen sollen. Nach HART ist in einem solchen Fall die Verwendung des RTLX ausreichend [HART88, S. 906]. Der NASA RTLX-Score, der die Gesamtbeanspruchung darstellt, ergibt sich aus dem Mittelwert der Bewertungen dieser sechs Dimensionen. Dieses Verfahren ermöglicht eine differenzierte Bewertung der wahrgenommenen kognitiven Beanspruchung und deren Verlauf über die verschiedenen Kompetenzstufen hinweg.

Der SUS ist ein etabliertes und zuverlässiges Instrument zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von Produkten oder Dienstleistungen, insbesondere im industriellen Kontext [BROO96]. Der Fragebogen besteht aus zehn Items, die auf einer fünfstufigen Likert-Skala von „stimme gar nicht zu“ (1) bis „stimme voll zu“ (5) beantwortet werden. Dabei wechseln sich positiv formulierte Fragen (ungerade Items) mit negativ formulierten Fragen (gerade Items) ab (siehe Abbildung E-2 im Anhang E). Diese Abwechslung dient dazu, Antworttendenzen wie Zustimmung oder Ablehnung bei allen Fragen zu vermeiden und die Aufmerksamkeit der Befragten während des Ausfüllens aufrechtzuerhalten. Ziel des SUS ist es, die subjektive Wahrnehmung der

Benutzerfreundlichkeit eines Systems in einem Gesamtwert zwischen 0 und 100 auszudrücken [BROO96].

Der SUS-Score wird berechnet, indem für jedes Item ein Wert ermittelt und die Summe dieser Werte skaliert wird. Die Berechnung folgt der nachstehenden Formel:

$$SUS_{score} = 2,5 \left(\sum_{i=1}^5 (SUS_{2i-1} - 1) + (5 - SUS_{2i}) \right) \in [0; 100] \quad (7.1)$$

$SUS[i]$ steht für den Likert-Wert des i -ten Items im Fragebogen. Die Transformation von der ursprünglichen Skala (10 bis 50) auf eine Skala von 0 bis 100 erleichtert die Interpretierbarkeit [BROO96] und ermöglicht eine Bewertung gemäß den in Abbildung 7-6 dargestellten Bereichen.

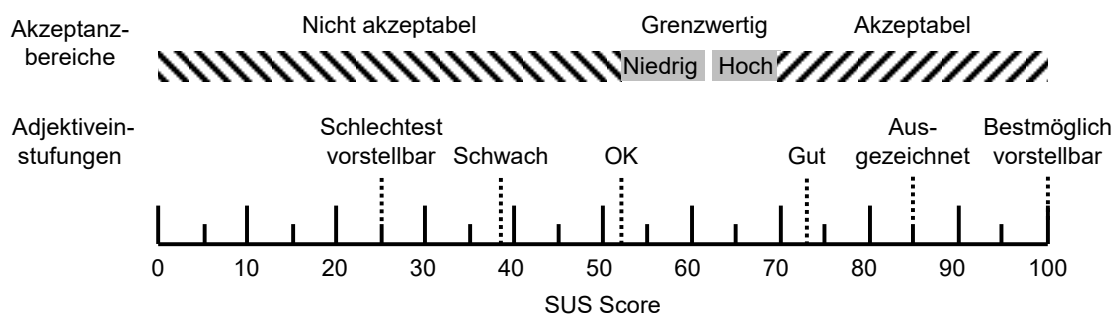


Abbildung 7-6: Kategorisierung des SUS-Scores: Akzeptanzbereiche und Adjektiveinstufungen (eigene Darstellung in Anlehnung an BANG09, S. 120)

Das TAM ist ein bewährtes Modell zur Bewertung der Nutzerakzeptanz neuer Technologien [DAVI89]. Es zielt darauf ab, die Akzeptanz von Technologien vorherzusagen, zu erklären und zu verbessern. Das Modell basiert auf zwei zentralen Dimensionen:

1. **Wahrgenommene Nützlichkeit (Perceived Usefulness, PU):** Diese Dimension misst, inwieweit Nutzer der Ansicht sind, dass eine Technologie ihre Arbeitsleistung verbessert oder ihre Aufgaben erleichtert.
2. **Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (Perceived Ease of Use, PEOU):** Diese Dimension bezieht sich auf die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit der Technologie und darauf, wie einfach sie zu erlernen und zu verwenden ist.

Beide Faktoren beeinflussen die Einstellung zur Nutzung (Attitude Toward Use, ATU) und die Verhaltensabsicht (Behavioral Intention, BI), ein System zu verwenden. Diese Faktoren wiederum bestimmen die tatsächliche Nutzung der Technologie. Die Bewertung erfolgt anhand eines Fragebogens mit 13 Items, bei denen die Teilnehmer ihre Zustimmung zu den Aussagen auf einer Likert-Skala von 1 (stimme gar nicht zu) bis 5 (stimme voll zu) angeben (siehe Abbildung E-3 im Anhang E). Höhere Werte spiegeln eine stärkere Zustimmung wider. Die Ergebnisse werden aggregiert und analysiert, um

PU, PEOU, ATU und BI zu bewerten. Das TAM bietet eine strukturierte Grundlage, um die Akzeptanz des hier untersuchten nutzeradaptiven KAS zu analysieren.

Zusätzlich wird ein Fragebogen mit vier geschlossenen Fragen (Items) zu den Schwellwerten eingesetzt. Die Antworten werden auf einer fünfstufigen Likert-Skala bewertet, deren Endpunkte je nach Frage unterschiedlich formuliert sind, z. B. von „überhaupt nicht passend“ (1) bis „sehr passend“ (5) oder von „überhaupt nicht sinnvoll“ (1) bis „sehr sinnvoll“ (5). Die Fragen sind im Ergebnisteil aufgeführt.

Unabhängige und abhängige Variablen

Als unabhängige Variablen werden in der Studie die Stufen (I, L, U, O) des Kompetenzstufenmodells betrachtet. Diese Stufen definieren den Grad der Unterstützung durch das KAS und beeinflussen gezielt die Informationstiefe der bereitgestellten Montageanweisungen, die sich entsprechend der Kompetenzstufe verändert.

Die abhängigen Variablen umfassen die Prozesszeit als Maß für die Effizienz der ausgeführten Montageprozesse, die Anzahl der Montagefehler zur Bewertung der Genauigkeit und Qualität der Arbeit sowie die kognitive Beanspruchung der Probanden, gemessen mit dem NASA-RTLX-Score. Ergänzend werden die Gebrauchstauglichkeit (SUS), die Technologieakzeptanz (TAM) sowie die subjektive Zufriedenheit und Akzeptanz durch geschlossene und offene Fragen erfasst.

Versuchsablauf

Zur Sicherstellung eines einheitlichen Versuchsablaufs wurde ein detaillierter Ablaufplan erstellt. Vor Beginn der Probandenstudie wurden die Probanden über die Versuchsziele informiert und in die Gegebenheiten der Vormontagestation sowie des KAS eingewiesen. Die Probanden meldeten sich mit ihrem Mitarbeiterausweis an der Montagestation an, woraufhin ihr Benutzerprofil aus einer globalen Datenbank aufgerufen und auf dem Touchscreen angezeigt wurde. Die Zeiterfassung begann, sobald die Probanden die erste Montageanweisung des KAS ausführten, und endete für jeden Durchgang nach Abschluss des letzten Montageprozesses.

Die Stufenwechsel innerhalb des Kompetenzmodells wurden vom RS berechnet und als Empfehlungen auf dem Touchscreen angezeigt. Der Wechsel in die nächste Stufe musste von den Probanden aktiv durch Betätigung eines Touchbuttons bestätigt werden, bevor der nächste Durchgang gestartet werden konnte. Bei Montagefehlern gab das KAS eine entsprechende Fehlermeldung aus. Der Fehler musste von den Probanden behoben werden, was zu einer Verlängerung der Prozesszeit führte, da die Fehlerbehebung in den Ablauf integriert war. Zum Zeitpunkt der Studie erfolgte das Weitschalten des KAS zwischen den Montageanweisungen nach dem Wizard-of-Oz-Prinzip. Dabei wurde die Interaktionsfunktion lediglich prototypisch implementiert und war technisch nicht funktionsfähig. Die Probanden wurden jedoch im Glauben gelassen, mit einem vollständig funktionsfähigen System zu interagieren, während ein Mensch („Wizard“) die Interaktion im Hintergrund manuell simulierte. [WEIS09]

7.2.2 Ergebnisse

Aufgrund der geringen Stichprobengröße kann keine Normalverteilung der Daten zugrunde gelegt werden. Daher werden intervallskalierte Variablen primär anhand des Medians (MD), des Minimalwerts (Min) und des Maximalwerts (Max) dargestellt, um eine robuste Beschreibung der zentralen Tendenz und der Spannweite zu ermöglichen. Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) werden ergänzend dort angegeben, wo sie zur besseren Veranschaulichung des durchschnittlichen Verlaufs sinnvoll erscheinen. Für ordinalskalierte Variablen werden ebenfalls Median, Min und Max verwendet.

Das mittlere Alter MD der 15 Probanden ($n = 15$) betrug 29 Jahre, das Durchschnittsalter MW lag bei $32 \pm 10,01$ Jahren (Min 22, Max 67 Jahre). Die Stichprobe umfasste 13 männliche (87 %) und zwei weibliche (13 %) Teilnehmer. Nach Selbsteinschätzung verfügten die Probanden überwiegend über geringe bis mittlere Erfahrung in der Ausführung manueller Montageprozesse.

Die durchschnittlichen Prozesszeiten der Probanden über die neun Durchgänge hinweg sind in Abbildung 7-7 dargestellt. Zu Beginn waren die Prozesszeiten deutlich höher, zeigten jedoch im Verlauf der Durchgänge eine abnehmende Tendenz. Ab dem fünften Durchgang stabilisierten sich die Zeiten auf einem nahezu konstanten Niveau. Die MTM-Vorgabezeit wurde dabei ab dem siebten Durchgang von einem geringen Anteil der Probanden erreicht oder unterschritten. Insgesamt lässt sich ein typischer Verlauf einer Lernkurve erkennen.

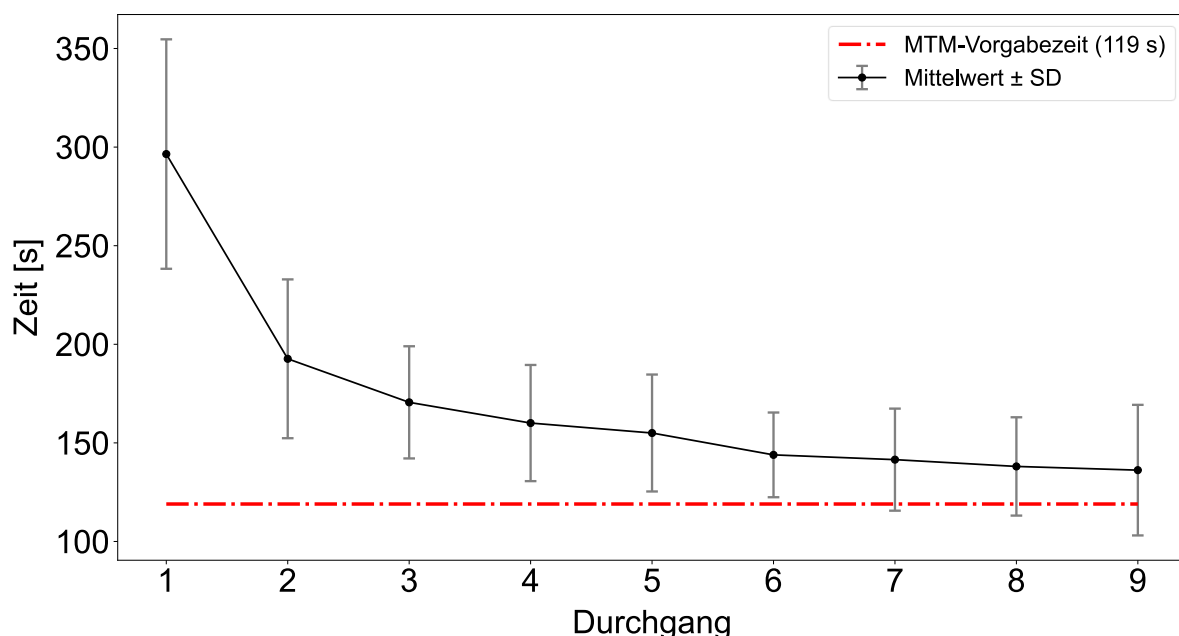


Abbildung 7-7: Prozesszeiten pro Durchgang

Abbildung 7-8 zeigt den gleitenden Mittelwert (GMW) der Prozesszeiten, der jeweils auf den letzten drei Durchgängen basiert, im Vergleich zu den Schwellwerten der

Kompetenzstufen. Die Darstellung erfolgt in Form von Boxplots. Diese zeigen den arithmetischen Mittelwert (Punkt), der den durchschnittlichen GMW der Prozesszeit repräsentiert, sowie den Median (horizontale Linie), der als robustes Lagemaß die mittlere Prozesszeit darstellt und weniger anfällig für Ausreißer ist. Der Interquartilsabstand (IQR) – dargestellt als Höhe der Box – beschreibt die Streuung der mittleren 50 % der Werte. Die Whisker reichen bis zum letzten Wert innerhalb des 1,5-fachen IQRs über bzw. unterhalb der Quartile und veranschaulichen damit den typischen Wertebereich.

Im dritten Durchgang unterschritt der GMW der meisten Probanden den Schwellwert zur Erreichung von Stufe L. Ab Durchgang 4 lagen die Prozesszeiten nahezu aller Probanden unterhalb des Schwellwerts für Stufe U. Der Schwellwert für Stufe O wurde von einem geringen Anteil der Probanden ab dem 6. Durchgang erreicht. Es ist zu beachten, dass die Probanden gemäß dem Kompetenzstufenmodell mindestens zwei Durchgänge in den Stufen L, U, O und mindestens drei Durchgänge in der Stufe I verbringen mussten.

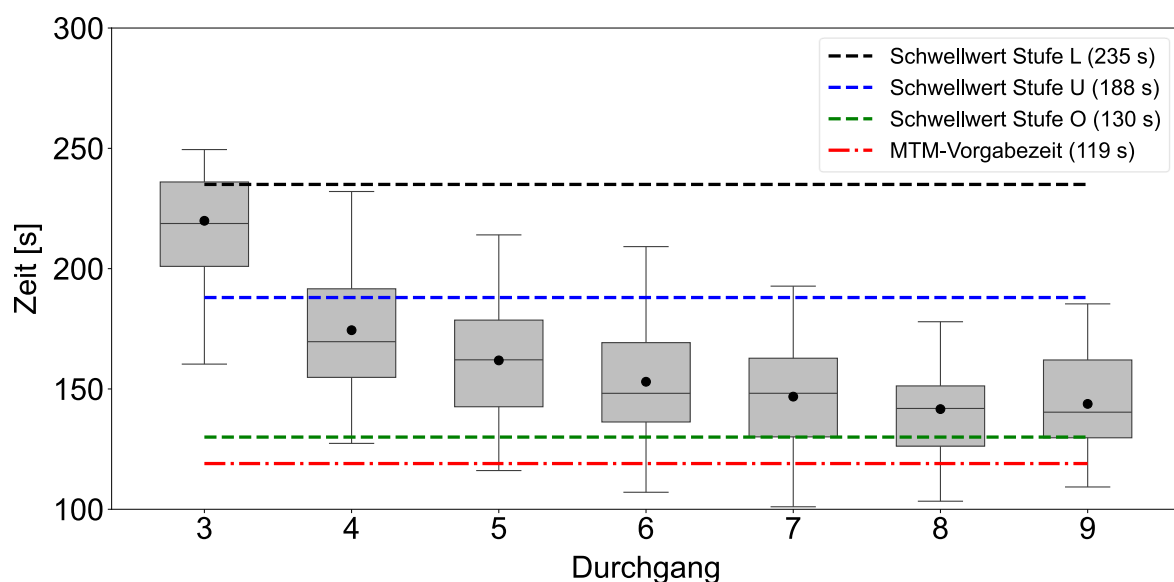


Abbildung 7-8: Gleitender Mittelwert Prozesszeiten

Die Probanden verbrachten im Mittel 3 Durchgänge in Stufe I (vorgegebenes Minimum: 3), 2 Durchgänge in Stufe L (vorgegebenes Minimum: 2) und 3 Durchgänge in Stufe U (vorgegebenes Minimum: 2).

Die kognitive Beanspruchung vor und nach den Stufenwechseln ist in Abbildung 7-9 ebenfalls in Form von Boxplots dargestellt. Neben dem Median, dem arithmetischen Mittelwert, dem IQR und den Whiskern werden hier auch Ausreißer als kleine Kreise visualisiert. Sie markieren Messwerte außerhalb des typischen Wertebereichs, also außerhalb des 1,5-fachen IQR. Über die Durchgänge hinweg zeigt sich ein deutlicher Abwärtstrend der kognitiven Beanspruchung in den verschiedenen Kompetenzstufen.

Insbesondere nach dem ersten Durchgang, der die initiale kognitive Beanspruchung in Stufe I zeigt, sind die Scores noch relativ hoch. Mit dem Wechsel in höhere Kompetenzstufen – einer leistungsgestützten Hochstufung im Modell – sinkt die kognitive Beanspruchung deutlich. Gleichzeitig nimmt die Streuung der Werte zwischen den Probanden mit zunehmender Kompetenzstufe deutlich ab.

Es ist zu beachten, dass nicht alle Probanden den Wechsel in Stufe O und einen Durchgang in dieser Stufe absolviert haben, was sich in der geringeren Anzahl von Probanden (n=10 bzw. n=5) in diesen Messpunkten widerspiegelt.

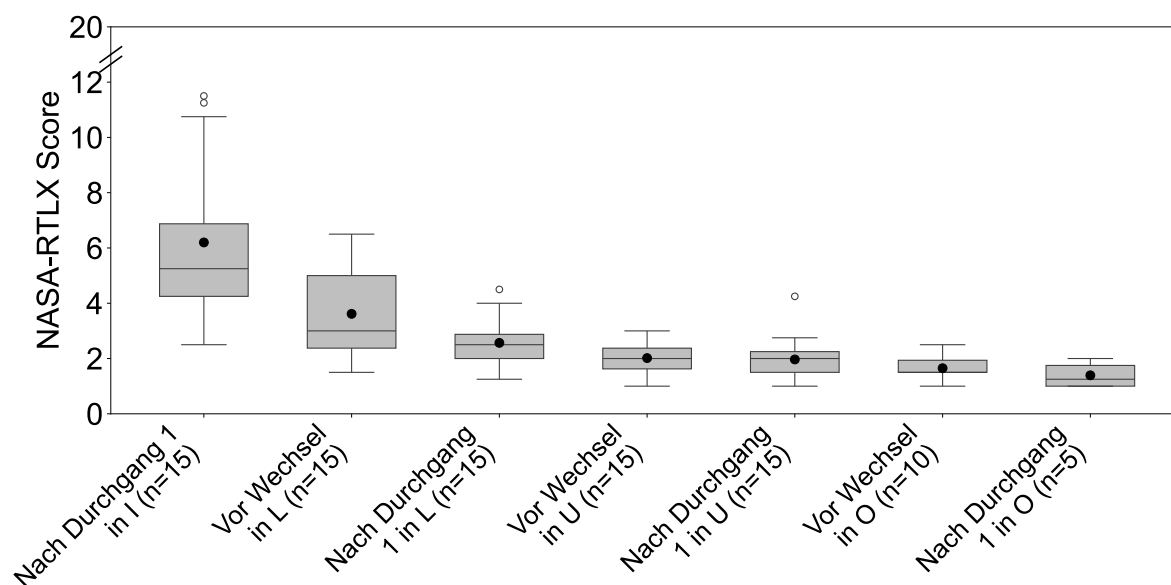


Abbildung 7-9: NASA-RTLX Scores zur kognitiven Beanspruchung vor und nach Stufenwechseln [KELM25b, S. 90]

Tabelle 7-2 fasst die Bewertungen der Probanden zu verschiedenen Aspekten der Kompetenzstufen bzw. der Schwellwerte zusammen. Die Vorschläge des Systems zur Hochstufung, der Verwendung des GMW sowie die Mindestanzahl von zwei Durchgängen in einer Stufe wurden überwiegend positiv bewertet (Median jeweils 4). Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der Frage zur eigenen Konfiguration des Assistenzsystems kein klares Bild, da die Bewertungen hier deutlich variieren und der Median bei 3 liegt.

Tabelle 7-2: Geschlossene Fragen zu den Kompetenzstufen

Frage	MD	Min	Max
Wie passend fanden Sie die Vorschläge des Systems, Sie in eine höhere Kompetenzstufe hochzustufen?	4	3	5

Frage	MD	Min	Max
Halten Sie die Verwendung eines gleitenden Mittelwerts der letzten 3 Montagezyklen für eine sinnvolle Methode zur Bewertung der Kompetenzentwicklung und Hochstufung?	4	2	5
Halten Sie es für sinnvoll, mindestens 2 Durchgänge in einer Stufe zu verbringen?	4	4	5
Würden Sie es bevorzugen, die Konfiguration des Assistenzsystems und der bereitgestellten Informationen selbst auszuwählen, anstatt den Vorschlägen des Systems zu folgen?	3	1	4

Die Gebrauchstauglichkeit des Systems, gemessen mit dem SUS, erreichte einen durchschnittlichen Score von $87,83 \pm 4,17$, was nach BANGOR ET AL. (2009) in den Bereich „ausgezeichnet“ fällt.

Die Ergebnisse des TAM sind in Tabelle 7-3 dargestellt. Die durchgängig hohen Medianwerte bei gleichzeitig geringer Streuung deuten auf eine positive Wahrnehmung und hohe Akzeptanz des nutzeradaptiven Systems hin.

Tabelle 7-3: Ergebnisse TAM

Dimension	MD	Min	Max
Wahrgenommene Nützlichkeit (PU)	4,38	2,5	5
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (PEOU)	4,5	3,25	5
Einstellung zur Nutzung (ATU)	4,33	3,33	5
Verhaltensabsicht (BI)	4,5	3	5

Die Hauptaussagen der Probanden aus den unstrukturierten Interviews sind in Tabelle 7-4 zusammengefasst. Besonders häufig wurde die Funktion der Laserprojektionen positiv hervorgehoben.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den unstrukturierten Interviews

Thema	Hauptaussagen der Probanden	Anzahl Nennung
Laserprojektionen	Die Laserprojektion wird nicht als störend empfunden, sondern vermittelt Sicherheit im Prozess und dient als hilfreiche Rückversicherung. Daher wird Stufe U – mit reiner Laserunterstützung – als optimal wahrgenommen.	12

Thema	Hauptaussagen der Probanden	Anzahl Nennung
Stufenaufstieg	Beim Aufstieg sollte klar kommuniziert werden, welche Änderungen in der Konfiguration des KAS vorgenommen werden.	7
Montageanweisungen und Arbeitsprozess	Zu Beginn werden die Animationen intensiv genutzt, um die Abläufe nachzuvollziehen. Sie erweisen sich dabei als hilfreiche Unterstützung. Nach den ersten beiden Durchgängen dienen sie überwiegend der Kontrolle. Anfangs liegt der Fokus vor allem auf den visuellen Elementen wie Bildern und Animationen, während der begleitende Text primär zur Rückversicherung genutzt wird.	7
Gamification	Der Gamification-Ansatz motiviert, da er einen Belohnungseffekt auslöst und zu einer schnelleren Bearbeitung anregt.	6
Informationsdarstellung	Die Projektionen mit Bildern und Animationen sind wirklich hilfreich und erleichtern das Verständnis. Der Text hilft insbesondere, wenn eine Information unklar ist oder aus den Bildern nicht hervorgeht.	5

7.2.3 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Relevanz diskutiert und in den Forschungskontext eingeordnet.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Prozesszeiten zeigten über die Durchgänge hinweg eine deutliche Abnahme und stabilisierten sich ab dem fünften Durchgang auf einem nahezu konstanten Niveau (Abbildung 7-7). Die Darstellung des GMW der letzten drei Durchgänge (Abbildung 7-8) belegt, dass die Probanden die Schwellwerte der Kompetenzstufen meist ab Durchgang 3 für Stufe L und ab Durchgang 4 für Stufe U unterschritten. Gleichzeitig nahm die kognitive Beanspruchung mit höheren Kompetenzstufen ab (Abbildung 7-9), während die Streuung der Werte ebenfalls zurückging. Der SUS-Score zeigt eine hohe Gebrauchstauglichkeit des Systems, und die Ergebnisse des TAM weisen auf eine positive Wahrnehmung und Akzeptanz des nutzeradaptiven KAS hin. Ergänzend unterstrichen qualitative Daten aus den unstrukturierten Interviews die Bedeutung der Laserprojektionen für die Prozesssicherheit sowie die hohe Akzeptanz von Gamification-Elementen.

Interpretation der Ergebnisse

Die beobachtete Lernkurve bestätigt die Wirksamkeit des Systems und zeigt einen deutlichen Abwärtstrend der Montagezeiten. Zu Beginn waren die Zeiten am höchsten,

reduzierten sich jedoch sukzessive und stabilisierten sich ab dem fünften Durchgang auf einem konstanten Niveau. Dies deutet auf den Kompetenzzuwachs der Probanden durch die wiederholte Ausführung der Aufgaben hin und bestätigt zugleich, dass die Reduktion der Anweisungstiefe keinen Leistungsabfall zur Folge hatte.

Der GMW, der zur Bewertung der Kompetenzstufen eingesetzt wurde, hat sich als praktikable Methode erwiesen, was durch die positiven Rückmeldungen in den geschlossenen Fragen sowie die hohen Bewertungen im TAM gestützt wird. Die Zustimmung zur Sinnhaftigkeit von mindestens zwei Durchgängen pro Stufe unterstreicht, dass die Probanden den Schwellwertmechanismus als zielführend für den Kompetenzzuwachs wahrnehmen.

Die Reduktion der NASA-RTLX-Scores über die verschiedenen Kompetenzstufen hinweg deutet darauf hin, dass das System die kognitive Beanspruchung bei steigender Kompetenz erfolgreich minimiert. Die stetige Abnahme unterstreicht des Weiteren die Effektivität des Kompetenzstufenmodells sowie des KAS, die den Lernprozess unterstützen. Die geringere Streuung der Werte in höheren Stufen deutet auf eine konsistentere Wahrnehmung der Arbeitsanforderungen in den höheren Stufen hin. Darüber hinaus verdeutlicht sie, dass das Modell den individuellen Lernfortschritt berücksichtigt, ohne die Probanden zu überfordern. Dies bestätigt die Sinnhaftigkeit der definierten Schwellwerte sowie die Mindestanzahl an Durchgängen pro Stufe.

Die Bewertungen des TAM belegen die hohe Akzeptanz des nutzeradaptiven Systems. Die Verhaltensabsicht zur weiteren Nutzung (MD: 4,5; Min: 3,0; Max: 5,0) als zentrale Dimension untermauert die positive Resonanz der Probanden. Der hohe SUS-Score von $87,83 \pm 4,17$ bestätigt zusätzlich die hohe Benutzerfreundlichkeit des Systems.

Die qualitativen Ergebnisse aus den unstrukturierten Interviews ergänzen diese positiven Rückmeldungen. Die Probanden wiesen darauf hin, dass die Laserprojektionen als unterstützend und sicherheitsstiftend empfunden wurden und auch in höheren Stufen hilfreich blieben. Die Gamification-Elemente wurden als motivierender Faktor hervorgehoben, der zur zügigen Bearbeitung der Aufgaben beiträgt. In den ersten Durchgängen nutzten die Probanden die über den Beamer projizierten Anweisungen intensiv, später dienten sie vorrangig zur Rückversicherung.

Die Rückmeldungen zeigen außerdem, dass die Probanden eine klarere Kommunikation darüber bevorzugen würden, welche Änderungen das System bei einem Stufenwechsel vornimmt und welche Informationen entfallen. Dies könnte in zukünftigen Systemen durch eine transparentere Darstellung der Systemkonfiguration adressiert werden. Die Antworten aus der geschlossenen Frage zur eigenen Konfiguration des Systems legen zudem nahe, diese Möglichkeit ab der Kompetenzstufe O zuzulassen, um den Probanden eine individuellere Anpassung zu ermöglichen.

Limitationen

Die Probandenstudie weist Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen:

- Die Teilnehmeranzahl ist mit 15 Probanden vergleichsweise gering und hinsichtlich der Geschlechterverteilung unausgewogen, was den deskriptiven Charakter der Untersuchung unterstreicht und statistische Signifikanztests einschränkt.
- Die Erfassung der kognitiven Beanspruchung beruht ausschließlich auf Selbstauskunft durch den NASA-RTLX-Fragebogen. Die Einbindung objektiver Messmethoden wie die Erfassung von Vitalparametern (z. B. Herzrate und Herzratenvariabilität) könnte zusätzliche Erkenntnisse liefern.
- Es wurden keine Industriearbeiter, sondern Personal des Instituts und des Lehrstuhls bzw. dessen Umfeld als Probanden eingesetzt, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die industrielle Praxis limitiert.
- Die Dauer der Probandenstudie ist mit neun Durchgängen begrenzt. Dadurch fehlen Erkenntnisse über die langfristige Nutzung des Systems, insbesondere im Hinblick auf den Dauerbetrieb mit häufigen Produkt- und Variantenwechseln sowie Pausen- und Urlaubssituationen der Werker.
- Es wurde keine Kontrollgruppe berücksichtigt, die die Montageaufgabe ohne Unterstützung durch das Assistenzsystem bzw. ohne adaptive Anpassung der Informationstiefe bearbeitet. Eine eindeutige Abgrenzung zwischen Lerneffekten durch Wiederholung und der Wirkung des Systems ist daher nicht möglich. Ziel der Probandenstudie war jedoch vorrangig, erste Tendenzen zur Wirksamkeit des Ansatzes im Anwendungskontext aufzuzeigen.

Diese Aspekte könnten das Nutzerverhalten und die Akzeptanz des Systems im industriellen Umfeld beeinflussen und sollten in zukünftigen Studien berücksichtigt werden.

Fazit und Implikationen

Die Ergebnisse der Evaluierung deuten darauf hin, dass das Kompetenzstufenmodell zur Reduzierung der Prozesszeiten und zur Verringerung der kognitiven Beanspruchung beitragen kann. Die hohe Nutzerakzeptanz, gemessen anhand der SUS und des TAM, bestätigt das Potenzial des Systems für den praktischen Einsatz in realen Montageszenarien.

Offene Fragen bestehen jedoch hinsichtlich der Langzeitnutzung und der Übertragbarkeit auf eine breitere Anwendergruppe. Um diese Aspekte weiter zu untersuchen, sollten zukünftige Studien die Langzeiteffekte des Kompetenzstufenmodells zur Nutzeradaptivität analysieren und es an einer heterogeneren Probandengruppe, insbesondere in realen Produktionsumgebungen, erproben.

Für die Weiterentwicklung des nutzeradaptiven KAS ergeben sich mehrere Ansatzpunkte:

- Individuelle Konfigurierbarkeit ab Kompetenzstufe O: Nutzer sollten ab der höchsten Kompetenzstufe die Möglichkeit erhalten, die Informationsbereitstellung selbstständig zu konfigurieren. So könnten sie beispielsweise den Laserprojektor ausschließlich als Pick-by-Light-System nutzen oder sich ausschließlich Animationen der Fügeoperation über den Beamer projizieren lassen. Dadurch ließe sich das System noch gezielter an individuelle Bedürfnisse anpassen.
- Erhöhte Transparenz in der Kommunikation: Die Änderungen bei einem Stufenwechsel sollten klarer kommuniziert werden, insbesondere welche Anpassungen vorgenommen werden und welche Informationen entfallen. Dies würde das Verständnis und die Akzeptanz des Systems weiter erhöhen.

Wie bereits in Kapitel 6.2 beschrieben, wurden diese Erkenntnisse in Teilen als Iterationsschritt aufgegriffen und nach der Probandenstudie in die Umsetzung integriert.

7.3 Reflexion der Forschungsfragen

Die Evaluierung bestätigt, dass sowohl die nutzeradaptive Informationsbereitstellung als auch die teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen für KAS in einer realitätsnahen Umgebung erfolgreich umgesetzt werden können. Der integrierte Ansatz adressiert die in Kapitel 3.4.2 identifizierte Forschungslücke, indem er die Nutzeradaptivität mit einer beschleunigten Erstellung standardisierter Montageanweisungen für KAS verbindet und so zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen beiträgt. Dies unterstützt zum einen die individuelle Kompetenzentwicklung der Werker und führt zum anderen zu einer Effizienzsteigerung durch eine Verkürzung der Zeit zur Montageanweisungserstellung in der Arbeitsvorbereitung. Im Folgenden werden die Beantwortung der beiden Forschungsfragen und die Erfüllung der Anforderungen reflektiert.

Forschungsfrage 1:
Wie kann die Nutzeradaptivität eines Kognitiven Assistenzsystems durch die Art und Tiefe der Informationsbereitstellung personenindividuell und kompetenzgerecht gesteigert werden?

In der Dissertation wurde gezeigt, wie eine personenindividuelle Anpassung der Art und Tiefe der Montageanweisungen durch ein nutzeradaptives KAS umgesetzt werden kann. Die Verwendung eines vierstufigen Kompetenzstufenmodells ermöglicht eine dynamische Anpassung der Informationsbereitstellung an das individuelle Kompetenzniveau des Werkers. Dabei übernimmt das KAS in jeder Stufe eine spezifische Rolle.

Es fungiert zunächst als tutorielle Unterstützung für Anfänger, fördert im weiteren Verlauf die Festigung des Lernprozesses, unterstützt den Aufbau von Montageroutinen und dient schließlich als stiller Begleiter, der bei Bedarf gezielt Informationen bereitstellt. Diese abgestufte Skalierung der Informationstiefe gewährleistet, dass Werker in jeder Kompetenzstufe optimal unterstützt und weder über- noch unterfordert werden.

Damit wird die gestellte Anforderung einer dynamischen Nutzeradaptivität und einer flexiblen Skalierung der Informationsbereitstellung erfüllt. Die Evaluierung bestätigt zudem, dass Schwellwerte für die Anpassung der Informationsbereitstellung sinnvoll sind, da sie eine transparente und nachvollziehbare Kategorisierung der Kompetenzstufen ermöglichen.

Zur softwaretechnischen Realisierung der Nutzeradaptivität wurde ein Modell entwickelt, das als Teil eines Recommender-Systems die Kompetenzentwicklung der Werker kontinuierlich analysiert. Der gleitende Mittelwert der Prozesszeit dient dabei als zentraler Indikator zur Bewertung des Lernfortschritts. Basierend auf dieser Analyse kommuniziert das System gezielte Vorschläge zur Anpassung der Anweisungsart und -tiefe, die der Werker entweder annehmen oder ablehnen kann. Auf diese Weise wird eine ausgewogene Balance zwischen Unterstützung und Autonomie ermöglicht. Die Evaluierung bestätigt, dass diese partizipative Entscheidungsfreiheit die Akzeptanz des Systems erhöht und den Lernprozess positiv beeinflusst. Durch die Möglichkeit des Werkers, selbst über den Stufenwechsel zu entscheiden, wird die Anforderung einer partizipativen Gestaltung der Nutzerinteraktion erfüllt. Zusätzlich tragen Gamification-Elemente zur Motivation bei und steigern die Interaktion mit dem System.

Forschungsfrage 2:
<p>Wie kann die Effizienz bei der Erstellung und Anpassung von Montageanweisungen für Kognitive Assistenzsysteme gesteigert und die Anpassungszeit insbesondere bei Produktänderungen reduziert werden?</p>

Mit dem entwickelten AIG wurde eine teilautomatisierte Generierung von Montageanweisungen realisiert. Der Einsatz von feinabgestimmten LLMs und strukturierten Prompts ermöglicht die teilautomatisierte Erstellung modularer und skalierbarer Montageanweisungen in unterschiedlichen Kompetenzstufen.

Durch die generische Modellierung montageanweisungsrelevanter Zusammenhänge manueller Montageprozesse wurde ein standardisiertes generisches Modell entwickelt, das eine normkonforme und systematische Erstellung der Anweisungen für eine Vielzahl unterschiedlicher manueller Montageprozesse ermöglicht. Es basiert auf standardisierten, modularen Syntaxbausteinen und stellt eine einheitliche, normgerechte Struktur sicher, sodass die Montageanweisungen erstellerunabhängig verständlich sind. Der Wandlungsbefähiger Modularität ermöglicht skalierbare

Anweisungselemente, während der Wandlungsbefähiger Universalität sicherstellt, dass verschiedene Montageprozesse durch einheitliche Syntaxmuster abgedeckt werden. Dadurch wird eine schnellere Erstellung sowie eine durchgängige Standardisierung der Montageanweisungen erreicht. Damit ist die gestellte Anforderung einer standardisierten, universellen Syntax erfüllt.

Ein wesentlicher Bestandteil der Lösung ist die Nutzung vorhandener Informationen aus der Arbeitsvorbereitung. Durch die Integration von MTM-Analysen und tabellari-schen Montagevorranggraphen in den Erstellungsprozess wird sichergestellt, dass vorhandene Informationen für die Montageanweisungserstellung, wie in den Anforderungen formuliert, genutzt werden.

Die Anforderung einer teilautomatisierten Erstellung von Montageanweisungen wird durch den AIG erfüllt. Die Texterstellung erfolgt automatisch durch die feinabgestimmten LLMs, bestimmte Inhalte, wie Bilder und zusätzliche Informationen, die nicht aus der MTM-Analyse oder Montagevorranggraphen hervorgehen, müssen manuell ergänzt werden. Eine zentrale Stärke des AIG besteht in der Fähigkeit Montageanweisungen automatisch für alle vier Kompetenzstufen in unterschiedlichen Sprachen generieren zu können. Dies bildet die Grundvoraussetzung für die Nutzung des Kompetenzstufenmodells und ermöglicht die dynamische Nutzeradaptivität des KAS.

Die Evaluierung zeigt, dass durch die Nutzung des AIG eine deutliche Reduktion des Erstellungsaufwands erreicht wird. Die experimentelle Untersuchung ergab eine durchschnittliche Zeitersparnis von drei Minuten pro Anweisung. Die Break-Even-Analyse verdeutlicht, dass sich der Einsatz des AIG bereits ab einer jährlichen Erstellung von 357 Montageanweisungen wirtschaftlich rentiert.

Die Beantwortung der Forschungsfragen zeigt, dass die entwickelten Lösungen einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen durch KAS leisten. Die nutzeradaptive Skalierung der Montageanweisungen trägt zur Wandlungsfähigkeit und Effizienzsteigerung bei, indem sie den Werker in die Lage versetzt, eine größere Produktvarianz mit personenindividueller und kompetenzgerechter Unterstützung zu beherrschen. Dadurch wird die Lerngeschwindigkeit erhöht und der vorgehaltene Fähigkeitsbereich, in dem die Werker agieren, erweitert. Weiterhin beschleunigt die teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen die Anpassung im Produktänderungsfall, wodurch sich die „Time-to-Market“ deutlich verkürzt. Durch die Vergrößerung des vorgedachten Lösungsraums wird somit die Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen gesteigert. Damit schränkt das KAS die Wandlungsfähigkeit der Montagestation nicht ein, sondern trägt direkt dazu bei diese zu steigern.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird die Dissertation zusammengefasst und ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation verfolgt das Ziel, einen Beitrag zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen durch den Einsatz Kognitiver Assistenzsysteme zu leisten. Dies erfordert die Entwicklung eines KAS, das eine nutzeradaptive Informationsbereitstellung zur Vermeidung von Über- und Unterforderung der Werker sowie eine effiziente Erstellung und Anpassung von Montageanweisungen zur Reduzierung des administrativen Aufwands bei Produktwechseln und neuen Produktvarianten ermöglicht.

In Kapitel 2 wurden zunächst die Grundlagen des Betrachtungsbereichs erläutert. Dabei wurden die industrielle Montage, die Interdependenzen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie Methoden der Zeitdatenermittlung und wandlungsfähige Montagesysteme beschrieben. Des Weiteren wurden KAS in der manuellen Montage thematisiert. Ferner wurden die menschliche Informationsverarbeitung, Lernkurven sowie der Kompetenzbegriff im Rahmen der manuellen Montage behandelt. Abschließend wurden LLMs als Teilbereich der generativen KI vorgestellt.

In Kapitel 3 wurde der Stand der Forschung anhand von zwei systematischen Literaturrecherchen in den Themenfeldern nutzeradaptive KAS sowie Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen analysiert, um bestehende Konzepte und Lösungsansätze im Hinblick auf die definierten Zielsetzungen zu untersuchen. Die anschließende Bewertung zeigte, dass zwar verschiedene Einzellösungen existieren, jedoch kein integrierter Ansatz vorliegt, der eine nutzeradaptive Informationsbereitstellung mit der automatisierten Erstellung standardisierter Montageanweisungen kombiniert, um die Wandlungsfähigkeit manueller Montagestationen zu steigern. Dieses Defizit stellt die identifizierte Forschungslücke dar und bildete die Grundlage für die Entwicklung des Lösungsansatzes.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden in Kapitel 4 die spezifischen Anforderungen an ein KAS zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von manuellen Montagestationen abgeleitet. Diese umfassen unter anderem die personenindividuelle Anpassung von Montageanweisungen an die Kompetenz der Werker durch die Skalierung der Informationsbereitstellungstiefe sowie die teilautomatisierte Erstellung standardisierter Montageanweisungen auf Grundlage vorhandener Informationen in der Arbeitsvorbereitung. Um eine strukturierte Umsetzung zu gewährleisten, wurde eine methodische Vorgehensweise in Anlehnung an das V-Modell gewählt.

In Kapitel 5 wurde zunächst der Systementwurf entwickelt, in dem die Gesamtfunktion des Systems in drei wesentliche Teilfunktionen zerlegt wurde. Anschließend wurde im Rahmen der konzeptionellen Modellierung ein vierstufiges nutzeradaptives Informationsbereitstellungsmodell zur kompetenzgerechten Anpassung der Art und Tiefe von Montageanweisungen eingeführt. Darüber hinaus wurden montageanweisungsrelevante Zusammenhänge unter Berücksichtigung des Zusammenspiels von Produkt, Prozess und Betriebsmittel in manuellen Montageprozessen generisch modelliert. Auf dieser Grundlage wurde eine standardisierte Syntax für Montageanweisungen abgeleitet, die Syntaxmodule sowohl für Entnahme- und Fügeoperationen als auch für prozessspezifische Warnungen und Fehlermeldungen bereitstellt.

Anschließend wurde in Kapitel 6 die praktische Umsetzung der entwickelten Modelle beschrieben. Dazu wurde im Rahmen des Forschungsprojektes H2SKaProMo ein prototypischer Demonstrator eines nutzeradaptiven KAS entwickelt und in eine manuelle Montagestation integriert. Zudem wurde ein Konzept zur Umsetzung der nutzeradaptiven Informationsbereitstellung innerhalb des Recommender-Systems zur menschenzentrierten Adaption des Arbeitsplatzes umgesetzt. Es analysiert die individuelle Kompetenz der Werker und passt darauf basierend die Art und Tiefe der Informationsbereitstellung dynamisch an. Dabei wurden partizipative Ansätze und Gamification-Elemente eingesetzt, um die Akzeptanz und Interaktion der Werker zu fördern. Darüber hinaus wurde der AIG implementiert, der eine teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen ermöglicht. Hierbei wurden MTM-Analysen als Grundlage genutzt, wobei fehlende Informationen manuell ergänzt werden können. Für die automatische Generierung wurden drei LLMs domänenspezifisch feinabgestimmt, um eine präzise und kontextgerechte Ausgabe zu gewährleisten. Mit Hilfe strukturierter Prompts erzeugt der AIG Montageanweisungen, Warnhinweise und Fehlermeldungen und ermöglicht so eine effiziente und einheitliche Erstellung dieser.

In Kapitel 7 wurde eine Evaluierung der entwickelten Konzepte und deren Umsetzung hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit durchgeführt. Die Evaluierung umfasste sowohl eine funktionale Prüfung des AIG als auch eine Bewertung der Qualität der generierten Montageanweisungen sowie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Die Ergebnisse zeigten, dass der Einsatz des AIG die Erstellung von Montageanweisungen erheblich beschleunigt, mit einer nachgewiesenen durchschnittlichen Zeiterparnis von drei Minuten pro Anweisung. Darüber hinaus wurde eine hohe Güte der generierten Montageanweisungen, Warnhinweise und Fehlermeldungen festgestellt. Diese spiegelt sich in hohen BLEU- und METEOR-Scores wider und bestätigt zugleich die inhaltliche sowie sprachliche Qualität der Anweisungen. Ferner wurde die Nutzeradaptivität des KAS im Rahmen einer Probandenstudie am Demonstrator evaluiert. Die Studie wurde realitätsnah an der manuellen Montage einer Baugruppe eines Brennstoffzellen-Stacks durchgeführt. Die Evaluation ergab eine hohe Gebrauchstauglichkeit des Kompetenzstufenmodells zur Nutzeradaptivität, gemessen anhand der SUS, sowie eine hohe Technologieakzeptanz gemäß dem TAM.

Abschließend wurde eine kritische Würdigung vorgenommen, die sowohl die erzielten Ergebnisse als auch die bestehenden Limitationen reflektiert.

Die Ergebnisse dieser Dissertation zeigen das Potenzial der entwickelten Konzepte und Lösungen, verdeutlichen jedoch gleichzeitig offene Forschungsfragen und weiterführende Forschungsbedarfe, die im Folgekapitel thematisiert werden.

8.2 Ausblick und konsekutiver Forschungsbedarf

Die wirtschaftliche Bewertung Kognitiver Assistenzsysteme sollte nicht nur auf die Effizienzsteigerung bei der Erstellung von Montageanweisungen beschränkt bleiben, sondern auch die Vorteile der Nutzeradaptivität näher untersuchen. Hierzu zählen insbesondere Einsparpotenziale durch eine schnellere Einarbeitung neuer Werker sowie eine reduzierte Personalbindung für Einweisungen. Eine umfassendere wirtschaftliche Betrachtung könnte Anreize für einen breiteren Einsatz solcher Systeme in der Industrie schaffen.

Des Weiteren sollten zukünftige Forschungsarbeiten untersuchen, wie sich die Akzeptanz für das nutzeradaptive Kompetenzstufenmodell sowie des Recommender-Systems über einen längeren Zeitraum (mehrere Monate) verhält und ob die Skalierung der Informationstiefe der Montageanweisungen auch bei wiederholter Nutzung weiterhin als sinnvoll und unterstützend empfunden wird.

Ergänzend wäre ein Vergleich mit einer Kontrollgruppe sinnvoll, die die Montageaufgabe lediglich auf Basis mündlicher Anweisungen ohne skalierte Anpassung der Informationstiefe durchführt. Die kognitive Beanspruchung ließe sich in beiden Gruppen mit dem NASA-RTLX erfassen, um differenzierte Aussagen zur Wirksamkeit und Entlastungswirkung des nutzeradaptiven Assistenzsystems zu ermöglichen.

Nicht zuletzt verarbeiten nutzeradaptive KAS personenbezogene Leistungsdaten. Die datenschutzrechtlichen Implikationen sowie Fragen der Akzeptanz innerhalb der Belegschaft wurden in dieser Dissertation nicht vertieft, sind jedoch entscheidend für die Umsetzung in der Praxis und sollten daher in zukünftige Forschungsarbeiten einfließen. Gerade in Deutschland stellt der Umgang mit personenbezogenen Leistungsdaten ein besonders sensibles Thema dar, das einer differenzierten Betrachtung bedarf.

Während der Fokus dieser Dissertation auf der manuellen Montage liegt, ist die Übertragung der entwickelten Konzepte auf andere industrielle Anwendungsfälle ein vielversprechender Forschungsansatz. Über die Montage hinaus könnte die nutzeradaptive Informationsbereitstellung und teilautomatisierte Erstellung von Montageanweisungen auch in anderen Produktionsbereichen wie der Instandhaltung, Logistik und Intralogistik sowie der Kommissionierung zu weiteren Effizienzsteigerungen führen.

Ein zentraler Aspekt zukünftiger Untersuchungen sollte des Weiteren die Nutzung vorhandener ERP- und MES-Systeme als Informationsquelle für die automatisierte Montageanweisungserstellung sein. Durch die Integration dieser Systeme könnte eine

nahtlose Bereitstellung relevanter Prozess- und Produktinformationen über MTM-Analysen oder Montagevorranggraphen hinaus erfolgen, wodurch der manuelle Aufwand bei der Anweisungserstellung weiter reduziert werden könnte. Dies würde nicht nur die Aktualität und Konsistenz der Montageanweisungen verbessern, sondern auch eine engere Verzahnung mit bestehenden Unternehmensprozessen ermöglichen.

Die in dieser Dissertation vorgestellten generativen KI-Modelle zur Erstellung von Montageanweisungen bieten weiteres Forschungspotenzial hinsichtlich ihrer Integration in bestehende, am Markt verfügbare Lösungen, wie z. B. CAD-basierte Editoren. Eine solche Einbindung könnte zu einer weiteren Automatisierung und Standardisierung der Anweisungserstellung für KAS beitragen. Ebenso eröffnet die technologische Weiterentwicklung generativer KI-Modelle neue Möglichkeiten, beispielsweise die automatische Generierung von Montageanweisungen auf Basis von Bildmaterial oder direkt aus Prozessdaten. In diesem Zusammenhang ist auch die generative Erzeugung von Bildern und Animationen zur visuellen Unterstützung von Montageprozessen eine vielversprechende Weiterentwicklung. Relevant ist zudem die Untersuchung der Leistungsfähigkeit lokal betriebener LLMs im On-Premise- oder Closed-Loop-Einsatz – insbesondere im Hinblick auf ihre Fähigkeit, Montageanweisungen datensicher und in vergleichbarer Qualität zu cloudbasierten Lösungen zu generieren.

Schließlich gilt es die langfristigen Auswirkungen von nutzeradaptiven KAS auf das Wissensmanagement in der Produktion zu untersuchen. Hierbei sind Ansätze zu entwickeln, die den Wissenstransfer innerhalb des Unternehmens fördern. Während KAS dazu beitragen können, den Know-how-Verlust beim Ausscheiden erfahrener Werker zu minimieren, besteht gleichzeitig die Herausforderung, dass eine zunehmende Externalisierung von Wissen potenziell zur Verlagerung von Arbeitsplätzen führen könnte. Die Untersuchung geeigneter Rahmenbedingungen, die sowohl den Wissens-erhalt als auch die Arbeitsplatzsicherheit berücksichtigen, stellt daher eine wichtige Aufgabe für die zukünftige Forschung dar.

Literaturverzeichnis

- [ABEL11] Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen München: Hanser, 2011
- [ADLE19] Adler, P.; Dander, H.: Digitale Unterstützung beim Lernen am manuellen Arbeitsplatz. In: Betriebspraxis & Arbeitsforschung. Zeitschrift für angewandte Arbeitswissenschaft. Jg. o., 2019, Nr. 237, S. 24–31
- [AEHN17] Aehnelt, M.: Informationsassistent zur kognitiven Automatisierung manueller Montagearbeitsplätze. Dissertation, Universität Rostock, Rostock, 2017
- [ARND21] Arndt, K.-D.: Arbeitsvorbereitung und Arbeitsplanung. In: Böge, A.; Böge, W.; Arndt, K.-D.; Bahmann, W.; Barfels, L., et al. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau. 24. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021, S. 1635–1671
- [BAEC18] Baechler, A.; Baechler, L.; Autenrieth, S.; Behrendt, H.; Funk, M., et al.: Systeme zur Assistenz und Effizienzsteigerung in manuellen Produktionsprozessen der Industrie auf Basis von Projektion und Tiefendatenerkennung. In: Wischmann, S.; Hartmann, E. A. (Hrsg.): Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, S. 33–49
- [BANE05] Banerjee, S.; Lavie, A.: METEOR: An Automatic Metric for MT Evaluation with Improved Correlation with Human Judgments. In: Goldstein, J.; Lavie, A.; Lin, C.-Y.; Voss, C. (Hrsg.): Proceedings of the ACL Workshop on Intrinsic and Extrinsic Evaluation Measures for Machine Translation and/or Summarization, Ann Arbor, USA, June 2005. Cambridge MA: MIT Press, 2005, S. 65–72
- [BANG09] Bangor, A.; Kortum, P.; Miller, J.: Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. In: Journal of Usability Studies. Jg. 4, 2009, Nr. 3, S. 114–123
- [BANN14] Bannat, A.: Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion. Dissertation, TU München, München, 2014
- [BASH23] Bashir, A.: Entwicklung eines intelligenten Kognitiven Assistenzsystems für dynamische Produktionsumgebungen. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2023

- [BAUE17] Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 1–31
- [BENG17] Bengler, K.; Lock, C.; Teubner, S.; Reinhart, G.: Grundlegende Konzepte und Modelle. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. München: Hanser, 2017, S. 54–60
- [BESG18] Besginow, A.; Büttner, S.; Röcker, C.: Intelligent Adaptive Assistance Systems in an Industrial Context – Overview of Use Cases and Features. In: Dachsel, R.; Weber, G. (Hrsg.): 5. Workshop zu Smart Factories: Mitarbeiterzentrierte Informationssysteme für die Zusammenarbeit der Zukunft, Mensch und Computer, Dresden, Germany, 02-05. September 2018. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V, 2018, S. 853–862
- [BIEG23] Biegel, T.: A self-supervised learning approach for multivariate statistical in-process control in discrete manufacturing processes. Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 2023
- [BLAE21] Blaesing, D.; Bornewasser, M.; Bendzioch, S.; Hinrichsen, S.; Nikolenko, A., et al.: Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen manuellen Montage. Ein Beitrag zur Steigerung von Montageproduktivität bei gleichzeitiger Reduktion von kognitiver Beanspruchung. In: Jeske, T.; Lennings, F. (Hrsg.): Produktivitätsmanagement 4.0. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 147–183
- [BLAE22] Blaesing, D.: Beanspruchungsmessung am Arbeitsplatz Erfassung physiologischer Korrelate mentaler Beanspruchung On-The-Job. Dissertation, Universität Greifswald, Greifswald, 2022
- [BOKR12] Bokranz, R.; Landau, K.: Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2012
- [BOMM21] Bommasani, R.; Hudson, D. A.; Adeli, E.; Altman, R.; Arora, S., et al.: On the Opportunities and Risks of Foundation Models. Stanford, 2021
- [BORN18] Bornewasser, M.; Bläsing, D.; Hinrichsen, S.: Informatorische Assistenzsysteme in der manuellen Montage: Ein nützliches Werkzeug zur Reduktion mentaler Beanspruchung? In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. Jg. 72, 2018, Nr. 4, S. 264–275
- [BOVE20] Bovenschulte, M.: Kognitive Assistenzsysteme. (Reihe: Themenkurzprofil). Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), 2020

- [BREI18] Bretkopf, N.: Adaptive Assistenz in der Produktion. Eine Methodik zur individuellen Mitarbeiterbefähigung (Reihe: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme, Bd. 2). 1. Aufl. Aachen: Schaker Verlag, 2018
- [BROO96] Brooke, J.: SUS: A 'quick and dirty' usability scale. In: Jordan, P. W.; Thomas, B.; Weerdmeester, B. A.; McClelland, I. L. (Hrsg.): Usability evaluation in industry. 1. Aufl. Bristol, PA: Taylor and Francis, 1996, S. 189–194
- [BULL86] Bullinger, H.-J.; Ammer, D.: Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis München, Wien: Hanser, 1986
- [BUND00] Bundesministerium der Finanzen: AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AV). Bundessteuerblatt Teil I Berlin, 2000
- [BURG21] Burggraef, P.; Dannapfel, M.; Adlon, T.; Föhlisch, N.: Adaptive assembly systems for enabling agile assembly – Empirical analysis focusing on cognitive worker assistance. In: Procedia CIRP. Jg. 97, 2021, S. 319–324
- [BURG24] Burggraef, P.; Adlon, T.; Steinberg, F.; Broehl, F.; Moriz, A., et al.: Automatic Generation of Assembly Instructions by Analyzing Process Recordings – A Concept Overview. In: Procedia CIRP. Jg. 126, 2024, S. 775–780
- [CISE02] Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Jg. 97, 2002, Nr. 9, S. 441–445
- [CLAE15] Claeys, A.; Hoedt, S.; Soete, N.; van Landeghem, H.; Cottyn, J.: Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems. In: IFAC-PapersOnLine. Jg. 48, 2015, Nr. 3, S. 924–929
- [CLAE16] Claeys, A.; Hoedt, S.; van Landeghem, H.; Cottyn, J.: Generic Model for Managing Context-Aware Assembly Instructions. In: IFAC-PapersOnLine. Jg. 49, 2016, Nr. 12, S. 1181–1186
- [CLAE18] Claeys, A.; Hoedt, S.; Schamp, M.; van Landeghem, H.; Cottyn, J.: Ontological Model for Managing Context-aware Assembly Instructions. In: IFAC-PapersOnLine. Jg. 51, 2018, Nr. 11, S. 176–181

- [CLAE19] Claey, A.; Hoedt, S.; Schamp, M.; van Ginste, L. de; Verpoorten, G.; Aghezzaf, El-Houssaine; Cottyn, Johannes: Intelligent Authoring and Management System for Assembly Instructions. In: Dagli, C. H.; Süer, G. A. (Hrsg.): 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing, Chicago, USA, 9th-14th August 2019. Procedia Manufacturing, 2019, S. 1921–1928
- [CROM23] Cromley, J. G.; Chen, R.: Instructional Support for Visual Displays: An Updated Literature Review. In: Technology, Knowledge and Learning. Jg. 29, 2023, S. 1191–1205
- [CSIK90] Csikszentmihalyi, M.: Flow - The Psychology of Optimal Experience. In: Journal of Leisure Research. Jg. 24, 1990, Nr. 1, S. 1–8
- [DAND21] Dander, H.; Adler, P.; Witt, G.: Soziotechnisches Lernsystem am Arbeitsplatz - Förderung der Kompetenz von Mitarbeitenden durch soziotechnische Assistenzsysteme zum flexiblen Einsatz am Arbeitsplatz. In: Industrie 4.0 Management. Jg. 37, 2021, Nr. 6, S. 47–51
- [DAVI89] Davis, F. D.: Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. In: MIS Quarterly. Jg. 13, 1989, Nr. 3, S. 319–340
- [DEJO60] DeJong, J. R.: Die Auswirkung zunehmender Fertigkeit. In: REFA Nachrichten. Jg. 13, 1960, S. 155–161
- [DENK16] Denkena, B.; Dittrich, M. A.; Winter, F.; Wagener, C.: Simulation-based planning and evaluation of personnel scheduling in knowledge-intensive production systems. In: Production Engineering. Jg. 10, 2016, Nr. 4-5, S. 489–496
- [DEUS12] Deuse, J.; Busch, F.: Zeitwirtschaft in der Montage. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012, S. 79–107
- [DIN03] DIN Norm 8593 (2003). DIN 8593 Fertigungsverfahren Fügen. Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [DIN04] DIN EN ISO Norm 6385 (2004). DIN EN ISO 6385 Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen
- [DIN14] DIN IEC Norm 60050-351 (2014). DIN IEC 60050-351 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Teil 351: Leittechnik
- [DIN17] DIN EN ISO Norm 9241 (2017). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung

- [DIN18a] DIN EN ISO Norm 10075 (2018). Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung. Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe
- [DIN18b] DIN EN ISO Norm 9241 (2018). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte
- [DIN20] DIN EN ISO Norm 9241 (2020). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 110: Interaktionsprinzipien
- [DOLL14] Dollinger, C.; Lock, C.; Reinhart, G.: Integration der Kompetenzentwicklung in die Montage mit Hilfe von Assistenzsystemen. In: Weidner, R.; Redlich, T. (Hrsg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Hamburg: Univ. der Bundeswehr Hamburg Laboratorium Fertigungstechnik, 2014, S. 339–346
- [DOUG23] Douglas, M. R.: Large Language Models. Cambridge MA, USA, 2023
- [DUDE24] Duden: Assistenz. URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Assistenz> [Stand:27.08.2024]
- [DYNA25] Dynamic Projection Institute GmbH: Mirror Head EN NV | Dynamic Projection. URL: <https://www.dynamicprojection.com/mirror-head-en-2/> [Stand:20.02.2025]
- [EILE15] Eilers, J.: Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme. (Reihe: Fertigungsmesstechnik & Qualitätsmanagement, Bd. 9). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl., 2015
- [ELMA09a] ElMaraghy, H. A.; Wiendahl, H.-P.: Changeability - An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer, 2009, S. 3–24
- [ELMA09b] ElMaraghy, H. A.: Changing and Evolving Products and Systems - Models and Enablers. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer, 2009, S. 25–45
- [ERPE15] Erpenbeck, J.; Sauter, W.: Wissen, Werte und Kompetenzen in der Mitarbeiterentwicklung. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015
- [EVER89] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 4. Fertigung und Montage (Reihe: Studium und Praxis, Bd. 4). 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989
- [FAST13] Fast-Berglund, Å.; Fässberg, T.; Hellman, F.; Davidsson, A.; Stahre, J.: Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly. In: Journal of Manufacturing Systems. Jg. 32, 2013, Nr. 3, S. 449–455

- [FRAN09] Franke, J.; Risch, F.: Effiziente Erstellung, Distribution und Rückmeldung von Werkerinformationen in der Montage. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Jg. 104, 2009, Nr. 10, S. 822–826
- [FUER25] Fuer Gruender: Arbeitgeberbrutto: Was kostet der eigene Mitarbeiter? URL: <https://www.fuer-gruender.de/wissen/unternehmen-fuehren/buchhaltung/lohnbuchhaltung/arbeitgeberbrutto/> [Stand:02.02.2025]
- [FUNK15a] Funk, M.; Dingler, T.; Cooper, J.; Schmidt, A.: Stop helping me - I'm bored! In: Mase, K.; Langheinrich, M.; Gatica-Perez, D.; Gellersen, H.; Choudhury, T., et al. (Hrsg.): The 2015 ACM International Joint Conference, Osaka, Japan, 07th-11th September 2015. New York, USA: ACM Press, 2015, S. 1269–1273
- [FUNK15b] Funk, M.; Bächler, A.; Bächler, L.; Korn, O.; Krieger, C.; Heidenreich, Thomas; Schmidt, Albrecht: Comparing projected in-situ feedback at the manual assembly workplace with impaired workers. In: Makedon, F.; Mariottini, G.-L.; Korn, O.; Maglogiannis, I.; Metsis, V. (Hrsg.): PETRA '15: 8th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, Corfu, Greece, 01th-03th July 2015. New York, USA: ACM Press, 2015, S. 1–8
- [FUNK16] Funk, M.; Kosch, T.; Schmidt, A.: Interactive worker assistance: Comparing the Effects of In-Situ Projection, Head-Mounted Displays, Tablet, and Paper Instructions. In: Lukowicz, P.; Krueger, A. (Hrsg.): UbiComp '16: The 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, Heidelberg, Germany, 12th-16th September 2016. New York, USA: ACM Press, 2016, S. 934–939
- [FUNK18] Funk, M.; Lischke, L.; Mayer, S.; Shirazi, A. S.; Schmidt, A.: Teach Me How! Interactive Assembly Instructions Using Demonstration and In-Situ Projection. In: Huber, J.; Shilkrot, R.; Maes, P.; Nanayakkara, S. (Hrsg.): Assistive Augmentation. Singapore: Springer, 2018, S. 49–73
- [GAIR81] Gairola, A.: Montagegerechtes Konstruieren. Grundlegende Gestaltungsmaßnahmen. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1981
- [GALA16] Galaske, N.; Anderl, R.: Approach for the Development of an Adaptive Worker Assistance System Based on an Individualized Profile Data Model. In: Schlick, C.; Trzcieliński, S. (Hrsg.): Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future. Basel: Springer International Publishing, 2016, S. 543–556

- [GÉRO19] Géron, A.: Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems (Reihe: Covid-19 collection). 2. Aufl. Beijing, Boston, Tokyo: O'Reilly, 2019
- [GOET14] Goetze, U.: Investitionsrechnung. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2014
- [GORS21] Gors, D.; Put, J.; Vanherle, B.; Witters, M.; Luyten, K.: Semi-automatic extraction of digital work instructions from CAD models. In: Procedia CIRP. Jg. 97, 2021, S. 39–44
- [GROß04] Große-Heitmeyer, V.; Wiendahl, H.-P.: Einführung. In: Wiendahl, H.-P.; Gerst, D.; Keunecke, L. (Hrsg.): Variantenbeherrschung in der Montage. Berlin: Springer, 2004, S. 3–17
- [HAAS24] Haas, P. H.; Kelm, B.; Margies, L.; Müller, R.: Development of an Adaptive Human-centered Work Station for Fuel Cell Stack Assembly. In: Procedia CIRP. Jg. 127, 2024, S. 32–37
- [HAAS25a] Haas, P. H.; Kelm, B.; Bashir, A.; Mueller, R.: Ein menschspezifisch adaptionsfähiges Montagesystem auf der Basis sensorischer Mitarbeitendenerfassung in der Montage von Brennstoffzellenstackkomponenten. In: Mueller, R.; Bashir, A. (Hrsg.): Assistenzsysteme in der Produktion und Montage. München: Hanser, 2025, S. in-print
- [HAAS25b] Haas, P. H.; Kelm, B.; Margies, L.; Mueller, R.: Entwicklung eines nutzendenspezifisch kompetenzbasierten Recommender-Systems zur menschzentrierten Adaption von Montagesystemparametern. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit, Aachen, Deutschland, 25-27 März 2025. Sankt Augustin: GFA-Press, 2025, S. 54-59
- [HANS24] Hans Böckler Stiftung: Lohnspiegel.de: Gehaltsauswertung für Programmierer/innen. URL: https://www.lohnspiegel.de/gehaltsinfos/programmierer_in_43423101.html?utm_source=chatgpt.com [Stand:02.02.2025]
- [HART06] Hart, S. G.: Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Jg. 50, 2006, Nr. 9, S. 904–908
- [HART88] Hart, S. G.; Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Meshkati, N.; Hancock, P. A. (Hrsg.): Human Mental Workload. Oxford: Elsevier Science, 1988, S. 139–183

- [HASL18] Haslgruebler, M.; Gollan, B.; Ferscha, A.: A Cognitive Assistance Framework for Supporting Human Workers in Industrial Tasks. In: IT Professional, IEEE Computer Society. Jg. 20, 2018, Nr. 5, S. 48–56
- [HAST09] Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. H.: The elements of statistical learning. Data mining, inference, and prediction (Reihe: Springer series in statistics). 2. Aufl. New York: Springer, 2009
- [HAUG16] Haug, S.; Glashauser, L.; Großmann, B.; Pohlt, C.; Schlegl, T.; Wackerbarth, Alena; Weber, Karsten: Gamification im Anlernprozess am Industriearbeitsplatz – ein inklusiver Ansatz. In: Weidner, R. (Hrsg.): 2. Transdisziplinären Konferenz "Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen", Hamburg, Deutschland, 12-13 Dezember 2016. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität, 2016, S. 421–430
- [HESS12a] Hesse, S.; Krahn, H.; Eh, D.: Betriebsmittel Vorrichtung. Grundlagen und kommentierte Beispiele 2. Aufl. München: Hanser, 2012
- [HESS12b] Hesse, S.: Montagegerechte Produktgestaltung. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012, S. 9–48
- [HINR16] Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A.: Assistance Systems in Manual Assembly. In: Villmer, F. J.; Padoano, E. (Hrsg.): Production engineering and management: proceedings 6th international conference, Lemgo, Germany, 29-30 September 2016. Lippe, Germany: Hochschule Ostwestfalen-Lippe, 2016, S. 3–14
- [HINR17] Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A.: Development of a projection-based assistance system for maintaining injection molding tools. In: (Hrsg.): 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 12th-10th December 2017. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017, S. 1571–1575
- [HINR20] Hinrichsen, S.: Informatorische Gestaltung der Montage mittels Assistenzsystemen. In: Bornewasser, M.; Hinrichsen, S. (Hrsg.): Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020, S. 21–42
- [HINR21] Hinrichsen, S.: Gestaltung von Anleitungen für die Montage variantenreicher Erzeugnisse. In: Hilmer, L.; Mahn, U. (Hrsg.): Ökologische Transformation in Technik, Wirtschaft und Gesellschaft? Tagungsband zur 26. Interdisziplinären Wissenschaftlichen Konferenz Mittweida (IWKM), Mittweida, Deutschland, 14-15 April 2021. Mittweida: Hochschule Mittweida, 2021, S. 92–96

- [HOLD16] Hold, P.; Ranz, F.; Sihm, W.: Konzeption eines MTM-basierten Bewertungsmodells für digitalen Assistenzbedarf in der cyber-physischen Montage. In: Schlick, C. (Hrsg.): Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation. Berlin: GITO mbH Verlag, 2016, S. 295–322
- [HOLD17] Hold, P.; Erol, S.; Reisinger, G.; Sihm, W.: Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. In: Procedia Manufacturing. Jg. 9, 2017, S. 143–150
- [HOLD20] Hold, P.: Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage. Dissertation, TU Wien, Wien, 2020
- [JACO13] Jacob, F.: Auftragsmanagement. In: Kleinaltenkamp, M.; Plinke, W.; Geiger, I. (Hrsg.): Auftrags- und Projektmanagement. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013, S. 1–57
- [JESK13] Jeske, T.: Entwicklung einer Methode zur Prognose der Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten. (Reihe: Industrial engineering and ergonomics, Bd. 13). Aachen: Shaker Verlag, 2013
- [JESK14] Jeske, T.; Meyer, F.; Schlick, C. M.: Einfluss der Gestaltung von Arbeitsplänen auf die Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. Jg. 68, 2014, Nr. 1, S. 1–6
- [KELL21] Keller, T.: Analyse der Effekte von Werkerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit manueller Montagesysteme. (Reihe: Schriftenreihe des PTW). Aachen: Shaker Verlag, 2021
- [KELM24] Kelm, B.; Haas, P. H.; Margies, L.; Mueller, R.: Entwicklung eines Konzepts zur Nutzeradaptivität Kognitiver Assistenzsysteme am Beispiel der manuellen Montage von Brennstoffzellenstackkomponenten. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeitswissenschaft in-the-loop: Mensch-Technologie-Integration und ihre Auswirkung auf Mensch, Arbeit und Arbeitsgestaltung, Stuttgart, 06-08 März 2024. Sankt Augustin: GFA-Press, 2024, S. Beitrag D.2.3
- [KELM25a] Kelm, B.; Haas, P. H.; Bashir, A.; Mueller, R.: Automatisierte Generierung standardisierter Montageanweisungen für Kognitive Assistenzsysteme mithilfe eines Large Language Models: Ein syntaktischer Ansatz. In: Mueller, R.; Bashir, A. (Hrsg.): Assistenzsysteme in der Produktion und Montage. München: Hanser, 2025, S. in-print

- [KELM25b] Kelm, B.; Haas, P. H.; Margies, L.; Mueller, R.: Evaluierung eines Kompetenzstufenmodells zur Nutzeradaptivität Kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit, Aachen, Deutschland, 25-27 März 2025. Sankt Augustin: GFA-Press, 2025, S. 87-92
- [KELM25c] Kelm, B.; Haas, P. H.; Jochum, S.; Margies, L.; Mueller, R.: Enhancing Assembly Instruction Generation for Cognitive Assistance Systems with Large Language Models. In: Procedia CIRP. Jg. 134, 2025, S. 7-12
- [KERB15] Kerber, F.; Lessel, P.: Adaptive und gamifizierte Werkerassistenz in der (semi-) manuellen Industrie 4.0-Montage. In: Rathmayer, S.; Pongratz, H. (Hrsg.): Proceedings of DeLFI Workshops 2015 colocated with 13th e-Learning Conference of, München, Deutschland, 01 September 2015. Gesellschaft für Informatik e.V., 2015, S. 28–35
- [KLEI17] Kleineberg, T.; Hinrichsen, S.; Eichelberg, M.; Busch, F.; Brockmann, D., et al.: Leitfaden: Einführung von Assistenzsystemen in der Montage. Lemgo: Hochschule Ostwestfalen-Lippe, 2017
- [KLUG11] Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. (Reihe: IPA-IAO Forschung und Praxis, Bd. 510). Heimsheim: Jost-Jetter, 2011
- [KOEL15a] Koelz, M.; Jordon, D.; Kurtz, P.; Hoerz, T.: Adaptive Assistance to Support and Promote Performance-Impaired People in Manual Assembly Processes. In: Yesilada, Y. (Hrsg.): The 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility, Lisbon, Portugal, 26th-28th October 2015. New York: ACM Press, 2015, S. 337–338
- [KOEL15b] Koelz, M.; Baechler, A.; Kurtz, P.; Hoerz, T.: Entwicklung eines interaktiv, adaptiven Montageassistenzsystems. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): VerANTWORTung für die Arbeit der Zukunft, Karlsruhe, Deutschland, 25-27 Februar 2015. Sankt Augustin: GFA-Press, 2015, S. Beitrag C.4.1
- [KONO09] Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung (Reihe: Vieweg Praxiswissen). 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2009
- [KOTH11] Kothes, L.: Grundlagen der Technischen Dokumentation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011
- [KRAU18] Krause, D.; Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018

- [LANG07] Lang, S.: Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion. (Reihe: Fertigungstechnik Erlangen, Bd. 181). Bamberg: Meisenbach Verlag, 2007
- [LANQ23] Lanquillon, C.; Schacht, S.: Knowledge Science – Grundlagen. Methoden der Künstlichen Intelligenz für die Wissensextraktion aus Texten Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023
- [LAP 24] LAP GmbH Laser Applikationen: CAD-PRO Laserprojektoren. URL: <https://www.lap-laser.com/de/produkte/cad-pro/> [Stand:09.12.2024]
- [LAVI11] Lavie, A.: Evaluating the Output of Machine Translation Systems. 13th MT Summit Xiamen, China, 2011
- [LECU15] LeCun, Y.; Bengio, Y.; Hinton, G.: Deep learning. In: Nature. Jg. 521, 2015, Nr. 7553, S. 436–444
- [LING94] Lingnau, V.: Variantenmanagement. Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie (Reihe: Betriebswirtschaftliche Studien, Bd. 58). Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1994
- [LOTT12] Lotter, E.: Hybride Montagesysteme. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012, S. 167–193
- [LOTT12a] Lotter, B.: Manuelle Montage von Kleingeräten. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012, S. 109–146
- [LOTT12b] Lotter, B.: Einführung. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012, S. 1–8
- [LOTT92] Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992
- [LUCZ93] Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. (Reihe: Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer, 1993
- [LUGA19] Lugaresi, C.; Tang, J.; Nash, H.; McClanahan, C.; Uboweja, E., et al.: MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines. Mountain View, USA, 2019
- [LUŠI17] Lušić, M.: Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess. (Reihe: Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 299). Bamberg: Meisenbach Verlag, 2017

- [MADE10] Mader, S.; Urban, B.: Creating Instructional Content for Augmented Reality based on controlled natural language concepts. In: Brooks, A. L. (Hrsg.): ICAT 2010, 20th International Conference on Artificial Reality and Telexistence., Adelaide, Australia, 01th-03th December 2010. Tokyo: VRSJ, 2010, S. 9–13
- [MAER12] Maerz, L.; Langsdorff, P. von: Flexibilität und Marktorientierung in der Montage. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Montageplanung - effizient und marktgerecht. Berlin: Springer, 2012, S. 3–10
- [MART09] Martinez Lastra, J.; Insaurralde, C.; Colombo, A.: Agent-based Control for Desktop Assembly Factories. In: Wang, L.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.): Collaborative design and planning for digital manufacturing. London: Springer, 2009, S. 265–290
- [MAST18] Masters, D.; Luschi, C.: Revisiting Small Batch Training for Deep Neural Networks. Bristol, 2018
- [MAY15] May, G.; Taisch, M.; Bettoni, A.; Maghazei, O.; Matarazzo, A.; Stahl, Bojan: A new Human-centric Factory Model. In: Selinger, G.; Mohd, N. (Hrsg.): Bahru, Malaysia, 22th-23th September 2014. Procedia CIRP, 2015, S. 103–108
- [MELV10] Melville, P.; Sindhvani, V.: Recommender Systems. In: Sammut, C.; Webb, G. (Hrsg.): Encyclopedia of Machine Learning. Boston, MA: Springer, 2010, S. 829–838
- [MENG18] Mengoni, M.; Ceccacci, S.; Generosi, A.; Leopardi, A.: Spatial Augmented Reality: an application for human work in smart manufacturing environment. In: Procedia Manufacturing. Jg. 17, 2018, S. 476–483
- [MERK21] Merkel, L. A.: Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage. Dissertation, TU München, München, 2021
- [MEYE24] Meyer, F.; Freitag, L.; Hinrichsen, S.; Niggemann, O.: Potentials of Large Language Models for Generating Assembly Instructions. In: Facchinetti, T. (Hrsg.): 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Padova, Italy, 10th-13th September 2024. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024, S. 1–8
- [MILL56] Miller, G. A.: The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. In: Psychological Review. Jg. 63, 1956, Nr. 2, S. 81–97
- [MUEL09] Mueller, R.; Brecher, C.: Studie Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation. Cluster of excellence integrative production technology for high wage countries (Reihe: Excellence in materials and production). Aachen: Apprimus Verlag, 2009

- [MUEL11a] Mueller, R.; Eilers, J.; Hasse, M.; Janßen, M.; Rochlitz, T., et al.: Wandlungsfähigkeit in der Montage - Chance für eine schwer planbare Zukunft. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachen: Shaker Verlag, 2011, S. 423–447
- [MUEL11b] Mueller, R.; Esser, M.; Eilers, J.: Rekonfigurationsorientierte Modularisierung von Montagesystemen. E-Mobilität erfordert Wandlungsfähigkeit. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 101, 2011, Nr. 9, S. 600–605
- [MUEL14] Mueller, R.; Vette, M.; Mailahn, O.; Ginschel, A.; Ball, J.: Innovative Produktionsassistenz für die Montage. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 104, 2014, Nr. 9, S. 552–560
- [MUEL17] Mueller, R.; Eilers, J.; Hermanns, L.; Gerdes, R.: Modellunterstützte Baubarkeitsprüfung in der Montageplanung*/Model-Assisted mountability check of engines in assembly planning. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 107, 2017, Nr. 04, S. 253–260
- [MUEL18] Mueller, R.; Vette-Steinkamp, M.; Hörauf, L.; Speicher, C.; Bashir, A.: Worker centered cognitive assistance for dynamically created repairing jobs in rework area. In: Procedia CIRP. Jg. 72, 2018, S. 141–146
- [MUEL21] Mueller, R.: Montagegerecht. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 725–754
- [MURP12] Murphy, K. P.: Machine learning. A probabilistic perspective (Reihe: Adaptive computation and machine learning series). Cambridge MA: MIT Press, 2012
- [NEB18] Neb, A.; Strieg, F.: Generation of AR-enhanced Assembly Instructions based on Assembly Features. In: Procedia CIRP. Jg. 72, 2018, S. 1118–1123
- [NORT21] North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wissensmanagement im digitalen Wandel. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2021
- [NYHU08] Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten Garbsen: TEWISS Verlag, 2008
- [OPPE94] Oppermann, R.; Simm, H.: Adaptability: User-Initiated Individualization. In: Oppermann, R. (Hrsg.): Adaptive user support. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1994, S. 14–66

- [OZDE24] Ozdemir, S.: Quick start guide to large language models. Strategies and best practices for using ChatGPT and other LLMs (Reihe: Addison-Wesley data & analytics series). Hoboken, NJ: Addison-Wesley, 2024
- [PAPI02] Papineni, K.; Roukos, S.; Ward, T.; Zhu, W.-J.: BLEU: a Method for Automatic Evaluation of Machine Translation. In: Isabelle, P. (Hrsg.): Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics - ACL '02, Philadelphia, USA, 7th-12th July 2002. Morristown, NJ: Association for Computational Linguistics, 2002, S. 311–318
- [PETZ20a] Petzoldt, C.; Keiser, D.; Beinke, T.; Freitag, M.: Requirements for an Incentive-Based Assistance System for Manual Assembly. In: Freitag, M.; Haasis, H.-D.; Kotzab, H.; Pannek, J. (Hrsg.): Dynamic in Logistics: Proceedings of the 7th International Conference LDIC, Bremen, Germany, February. Cham: Springer, 2020, S. 541–553
- [PETZ20b] Petzoldt, C.; Keiser, D.; Beinke, T.; Freitag, M.: Functionalities and Implementation of Future Informational Assistance Systems for Manual Assembly. In: Freitag, M.; Kinra, A.; Kotzab, H.; Kreowski, H.-J.; Thoben, K.-D. (Hrsg.): Subject-Oriented Business Process Management. The Digital Workplace – Nucleus of Transformation. Cham: Springer, 2020, S. 88–109
- [PETZ22] Petzoldt, C.; Keiser, D.; Schöbel, N.; Freitag, M.: Planung von Assistenzsystemen für die industrielle Montage. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Jg. 117, 2022, Nr. 3, S. 157–163
- [PFEI22] Pfeifroth, T.; Dietsch, M.; Mahlandt, R.: Projektionsbasierte Assistenz in der Montage. Laser- und Beamerprojektionen als Werkerassistenzsysteme in der manuellen Montage. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 112, 2022, Nr. 03, S. 146–150
- [PONN11] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen (Reihe: VDI-Buch). 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011
- [PROB12] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen Wiesbaden: Springer Gabler, 2012
- [RADO99] Radow, W. R.: Informationsmanagement in der manuellen Montage. (Reihe: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Bd. 514). Düsseldorf: VDI Verlag, 1999

- [RATH93] Rathnow, P. J.: Integriertes Variantenmanagement. Bestimmung, Realisierung und Sicherung der optimalen Produktvielfalt (Reihe: Innovative Unternehmensführung, Bd. 20). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1993
- [REFA78] REFA: Datenermittlung. (Reihe: Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Bd. 2). 6. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 1978
- [REFA85] REFA: Methodenlehre der Planung und Steuerung. Teil 1 Grundlagen. München: Carl Hanser Verlag, 1985
- [REFA97] REFA: Datenermittlung. (Reihe: Methodenlehre der Betriebsorganisation). München: Carl Hanser Verlag, 1997
- [REIN13] Reinhart, G.; Shen, Y.; Spillner, R.: Hybride Systeme – Arbeitsplätze der Zukunft *. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 103, 2013, Nr. 6, S. 543–547
- [REIN14] Reinhart, G.; Zäh, M.: Assistenzsysteme in der Produktion. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 104, 2014, Nr. 9, S. 516
- [REIN17] Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. München: Hanser, 2017, S. XXXI–XL
- [REIS18] Reisinger, G.; Komenda, T.; Hold, P.; Sihm, W.: A Concept towards Automated Data-Driven Reconfiguration of Digital Assistance Systems. In: Procedia Manufacturing. Jg. 23, 2018, S. 99–104
- [REIS21] Reisinger, G.; Hold, P.; Sihm, W.: Automated Information Supply of Worker Guidance Systems in Smart Assembly Environment. In: Ratchev, S. (Hrsg.): 9th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, Virtual event, 14th-15th December. Cham: Springer, 2021, S. 235–248
- [RODR15] Rodriguez, L.; Quint, F.; Gorecky, D.; Romero, D.; Siller, H. R.: Developing a Mixed Reality Assistance System Based on Projection Mapping Technology for Manual Operations at Assembly Workstations. In: Procedia Computer Science. Jg. 75, 2015, S. 327–333
- [RUPP21] Rupprecht, P.: Spatial Augmented Reality in der industriellen Großgeräte- und Baustellenmontage: Entwicklung eines Assistenzsystems mit dynamischer In-situ-Projektion und nutzeradaptiver Gesteninteraktion. Dissertation, TU Wien, Wien, 2021

- [RUSC21] Rusch, T.; Riegel, A.; Hueber, M.; Kerber, F.; Merkel, L., et al.: Synchronisation von Digitalisierung, Qualitätssicherung und Assistenzsystemen an Arbeitsplätzen mit geringem Automatisierungsgrad. In: Jeske, T.; Lennings, F. (Hrsg.): Produktivitätsmanagement 4.0. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 185–227
- [RUSC21] Rusch, T.; Steuer, J.; König, M.; Sochor, R.; Fink, K., et al.: Tool-based automatic generation of digital assembly instructions. In: Procedia CIRP. Jg. 99, 2021, S. 454–459
- [SCHL18] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018
- [SCHM13] Schmalen, H.: Grundlagen und Probleme der Betriebswirtschaft. 15. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2013
- [SCHO18] Scholer, M.: Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobilmontage mittels durchgängigem modularem Engineering -Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in der Unterbodenmontage-. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2018
- [SCHU10] Schuh, G.; Kampker, A.; Stich, V.; Kuhlmann, K.: Prozessmanagement. In: Schuh, G.; Kampker, A. (Hrsg.): Strategie und Management produzierender Unternehmen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, S. 327–382
- [SEHR21] Sehr, P.; Moriz, N.; Heinz, M.; Trsek, H.: Model-based approach for adaptive assembly assistance. In: IEEE (Hrsg.): 2021 IEEE 26th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vasteras, Sweden, 07th-10th September 2021. Piscataway, NJ: IEEE, 2021, S. 1–7
- [SHEI23] Sheikh, H.; Prins, C.; Schrijvers, E.: Mission AI. The New System Technology Cham: Springer, 2023
- [SMOD23] Smode, M.: 3D Depth Camera for Industrial Applications. URL: <https://www.framos.com/en/products-solutions/3d-depth-camera> [Stand:09.12.2024]
- [SOCH19] Sochor, R.; Kraus, L.; Merkel, L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Approach to Increase Worker Acceptance of Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly. In: Procedia CIRP. Jg. 81, 2019, S. 926–931
- [SPÄK21] Späker, L.; Mark, B. G.; Rauch, E.: Development of a Morphological Box to Describe Worker Assistance Systems in Manufacturing. In: Procedia Manufacturing. Jg. 55, 2021, S. 168–175

- [SPUR86] Spur, G.; Helwig, H.-J.: Einführung in die Montagetechnik. In: Spur, G.; Stöferle, T. (Hrsg.): Handbuch der Fertigungstechnik. 1. Aufl. München: Hanser, 1986, S. 591–606
- [STAT24] Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung. Inlandproduktberechnung Vierteljahresultimate (Reihe: Fachserie 18). Wiesbaden, 2024
- [STAT25] Statistisches Bundesamt: Bevölkerungspyramide: Altersstruktur Deutschlands von 1950 - 2070. URL: <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/index.html#!y=2050&a=20,67&g> [Stand:14.01.2025]
- [STEP24] stepstone.de: Prozessingenieur/in Gehälter in Deutschland 2024 - StepStone. URL: https://www.stepstone.de/gehalt/Prozessingenieur-in.html?utm_source=chatgpt.com [Stand:02.02.2025]
- [SYBE16] Syberfeldt, A.; Danielsson, O.; Holm, M.; Wang, L.: Dynamic operator instructions based on augmented reality and rule-based expert systems. In: Procedia CIRP. Jg. 41, 2016, S. 246–351
- [TEUB16] Teubner, S.; Reinhart, G.; Haymerle, R.; Merschbecker, U.: Individuelle und dynamische Werkerinformationssysteme. In: Weidner, R. (Hrsg.): 2. Transdisziplinäre Konferenz "Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen", Hamburg, Deutschland, 12-13 Dezember 2016. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität, 2016, S. 349–364
- [TEUB21] Teubner, S.: Dynamisches und individuelles Werkerinformationssystem für die manuelle Serienmontage. Dissertation, TU München, München, 2021
- [TROP24] Tropschuh, C.: Beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage. Dissertation, TU München, München, 2024
- [ULTR25] Ultralytics Inc.: Entdecke Ultralytics YOLO | State-of-the-Art Computer Vision. URL: <https://www.ultralytics.com/de/yolo> [Stand:19.02.2025]
- [UNRA16] Unrau, A.; Hinrichsen, S.; Riediger, D.: Development of Projection Based Assistance System for Manual Assembly. In: Sušić, A.; Davor, S. (Hrsg.): ERGONOMICS 2016 - Focus on Synergy, 6th International Ergonomics Conference, Zadar, Croatia, 15th-18th June 2016. Zagreb: CES, 2016, S. 365–370

- [VASW17] Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N.; Uszkoreit, J.; Jones, L.; Gomez, Aidan N.; Kaiser, Lukasz; Polosukhin, Illia: Attention is all you need. In: Luxburg, U. von; Guyon, I.; Bengio, S.; Wallach, H.; Fergus, R., et al. (Hrsg.): Advances in Neural Information Processing Systems 30. 31st Annual Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach, USA, 04th-09th Decemeber 2017. Red Hook, NY: NeurlIPS, 2017, S. 1–15
- [VDI04] VDI-Richtlinie 2206 (2004). VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme
- [VDI14] VDI-Richtlinie 3633 (2014). VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen. Grundlagen
- [VDI78] VDI-Richtlinie 2815 (1978). VDI 2815 Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung. Betriebsmittel
- [VDI78] VDI-Richtlinie 2815 (1978). VDI 2815 Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung. Einführung und Grundlagen
- [VDI90] VDI-Richtlinie 2860 (1990). Montage und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole
- [WARN84] Warnecke, H.-J.: Der Produktionsbetrieb. Eine Industriebetriebslehre für Ingenieure Berlin, Heidelberg: Springer, 1984
- [WATS10] Watson, G.; Butterfield, J.; Curran, R.; Craig, C.: Do dynamic work instructions provide an advantage over static instructions in a small scale assembly task? In: Learning and Instruction. Jg. 20, 2010, Nr. 1, S. 84–93
- [WATS20] Watson, R. T.; Webster, J.: Analysing the past to prepare for the future: Writing a literature review a roadmap for release 2.0. In: Journal of Decision Systems. Jg. 29, 2020, Nr. 3, S. 129–147
- [WEIN02] Weinert, F. E.: Vergleichende Leistungsmessung in Schulen - eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In: Weinert, F. E. (Hrsg.): Leistungsmessungen in Schulen. 2. Aufl. Weinheim, Basel: Beltz, 2002, S. 17–32
- [WEIS09] Weiss, A.; Bernhaupt, R.; Schwaiger, D.; Altmaninger, M.; Buchner, R.; Tscheligi, M.: User experience evaluation with a Wizard of Oz approach: Technical and methodological considerations. In: IEEE (Hrsg.): 2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2009), Paris, France, 07th-10th December 2009. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 303–308

- [WEST00] Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 90, 2000, Nr. 1-2, S. 22–26
- [WEST16] Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion. Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016
- [WICK00] Wickens, C. D.; Hollands, J. G.: Engineering psychology and human performance. 3. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000
- [WICK08] Wickens, C. D.: Multiple resources and mental workload. In: Human factors. Jg. 50, 2008, Nr. 3, S. 449–455
- [WIEN07] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H., et al.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In: CIRP Annals. Jg. 56, 2007, Nr. 2, S. 783–809
- [WIEN14] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten2. Aufl. München: Hanser, 2014
- [WIES14] Wiesbeck, M.: Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Dissertation, TU München, München, 2014
- [WOLF19] Wolfartsberger, J.; Haslwanter, J.; Lindorfer, R.: Perspectives on Assistive Systems for Manual Assembly Tasks in Industry. In: Technologies. Jg. 7, 2019, Nr. 1, S. 1–12
- [WRIG36] Wright, T. P.: Factors Affecting the Cost of Airplanes. In: Journal of the Aeronautical Sciences. Jg. 3, 1936, Nr. 4, S. 122–128
- [ZAEH05] Zaeh M. F.; Moeller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München: utzverlag, 2005, S. 3–10
- [ZAEH07] Zaeh, M. F.; Wiesbeck, M.; Engstler, F.; Friesdorf, F.; Schubö, A., et al.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage*. In: wt Werkstattstechnik online. Jg. 97, 2007, Nr. 9, S. 644–650
- [ZAEH09] Zaeh, M. F.; Beetz, M.; Shea, K.; Reinhart, G.; Bender, K., et al.: The Cognitive Factory. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer, 2009, S. 355–371
- [ZHAN23] Zhang, A.; Lipton, Z.; Li, M.; Smola, A. J.: Dive into Deep Learning. Cambridge: Cambridge University Press, 2023

- [ZUEH12] Zuehlke, D.: Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen. Useware-Engineering für technische Systeme (Reihe: VDI-Buch). 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012

A Anhang zu Kapitel 2

Tabelle A-1: Marktrecherche Kognitive Assistenzsysteme hinsichtlich Assistenzfunktionen (eigene Darstellung in Anlehnung an PETZ20a, S. 551)

Nummer	Produkt	Anbieter	Assistenzfunktion						Individualisierung/ Kompetenzstufen
			Ausgabe			Eingabe			
			Ausgabeeinheit	Informationsausgabe Montageanweisung		Eingabeeinheit	Informationseingabe		
				Entnahme	Platzieren		Kontrolle Fügeoperation	Fortfahren nach Operation	
1	Visual Assist	Bosch Rexroth AG	visuell (Laser, Bildschirm, Signalschiene)	optisch (Lichtsignal)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt)	optisch (Kamera)	-	Bewegungs- daten	-
2	Assembly Pro	LAP Laser	visuell (Laser)	-	optisch (Markierung)	haptisch (Taster)	-	manuell	-
3	Der schlaue Klaus	Optimum	visuell (Bildschirm, Signalschiene)	optisch (Lichtsignal)	optisch (Textinhalt, Live Bildinhalt, Markierung)	optisch (Kamera)	Ja	Bewegungs- daten	-
4	Der Assistent	Sight Broc	visuell (Projektor, Laser)	optisch (Markierung) / akustisch (Sprachausgabe)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt, Markierung, Animation)	optisch (Kamera)	Ja	Bewegungs- daten	-
			auditiv (Lautsprecher)					Bewegungs- daten	
5	Elam Professional	Armbruster	visuell (Bildschirm, Signalschiene)	optisch (Lichtsignal)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt)	optisch (Kamera)	-	Bewegungs- daten	-
6	Smart Assist	MiniTec Smart Solutions GmbH	visuell (Laser, Bildschirm, Signalschiene)	optisch (Lichtsignal)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt, Markierung)	optisch (Kamera)	-	Bewegungs- daten	-
7	Human Machine Interface Mate	Arkite B.V	visuell (Projektor, Laser)	optisch (Markierung)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt, Markierung, Animation)	optisch (Kamera)	Ja	Bewegungs- daten	Ja
8	LP- HFD2	Z-Laser	visuell (Laser)	-	optisch (Markierung)	haptisch (Taster)	-	manuell	-
9	MotionEAP	Schnaithmann Maschinenbau; Uni Stuttgart	visuell (Projektor, Laser)	optisch (Markierung)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt, Markierung, Animation)	optisch (Kamera)	Ja	Bewegungs- daten	Ja
10	nexonar Real-Time Location System	soft2tec GmbH	visuell (Bildschirm, Laser)	optisch (Bildinhalt)	optisch (Bildinhalt, Markierung)	kinästhetisch (Handschuh)	teilweise (nur Handbewegung)	Bewegungs- daten	-
11	OptoInspect3D	Fraunhofer IFF	visuell (Bildschirm)	-	optisch (Live Bildinhalt)	optisch (Kamera)	optional	gestikulär	-
12	QualityAssist	Sarissa GmbH	visuell (Bildschirm)	optisch (Bildinhalt)	optisch (Bildinhalt)	kinästhetisch (Handschuh)	teilweise (nur Handbewegung)	Bewegungs- daten	-
13	Assemblio Composer	Assemblio	-	-	-	-	-	-	-
14	CompuTer Aided Works	iie	visuell (Bildschirm, Projektor, Laser)	optisch (Markierung)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt, Markierung, Animation)	optisch (Kamera)	Ja	Bewegungs- daten	-
15	Smart Assembly Trainer	Fraunhofer IOSB-INA	visuell (Projektor)	optisch (Markierung)	optisch (Bildinhalt, Animation)	optisch (Kamera)	-	gestikulär	-
16	Kognitive Assistenzsysteme/ P2Light	Phoenix Mecano Solutions	visuell (Bildschirm, Sgnalschiene)	optisch (Lichtsignal)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt)	optisch (Kamera)	Ja	Bewegungs- daten	-
17	Assistenzsystem Desoutter	Desoutter	visuell (Bildschirm, Signalschiene)	optisch (Lichtsignal)	optisch (Textinhalt, Bildinhalt, Animation)	optisch (Tiefenbildsensor)	-	Bewegungs- daten	-
18	T2C Assembly	Attenio	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle A-1 bietet einen systematischen Überblick über derzeit am Markt verfügbare KAS und beschreibt deren spezifische Funktionen und Merkmale. Sie ist in mehrere Spalten unterteilt, die jeweils verschiedene Aspekte der Systeme beleuchten, wie z. B. die Art der Informationsausgabe und -eingabe.

Die Tabelle listet 18 unterschiedliche Produkte verschiedener Anbieter auf. Darunter befinden sich etablierte Unternehmen wie Bosch Rexroth sowie spezialisierte Anbieter wie die soft2tec GmbH. Dies zeigt die Vielfalt und das breite Spektrum an verfügbaren Lösungen, die von großen, bekannten Firmen bis hin zu spezialisierten Nischenanbietern reichen.

Arten der Informationsausgabe: Die Systeme nutzen unterschiedliche optische Ausgabeeinheiten (z. B. Laser, Bildschirme, Projektoren, Lautsprecher) und Informationsausgabearten (z. B. Lichtsignal, Textinhalt, Bildinhalte). Einige Systeme bieten auch auditives Feedback (z. B. Sprachausgabe). Dies zeigt, dass die Lösungen flexibel gestaltet sind, um Informationen an den Werker zu übermitteln und somit unterschiedliche Bedürfnisse und Präferenzen der Anwender berücksichtigen können.

Arten der Informationseingabe: Bei der Eingabe werden verschiedene Technologien genutzt, wie haptische Eingaben (z. B. Taster), Bewegungsdaten (z. B. über Kameras oder Handschuhe) und manuelle Eingaben. Es gibt auch Systeme, die keine Eingaben ermöglichen.

Tabelle A-2: Marktrecherche Kognitive Assistenzsysteme hinsichtlich der Montageanweisungserstellung (eigene Darstellung in Anlehnung an PETZ20a, S. 551)

Nummer	Produkt	Anbieter	Editor				Status	Hintergrund
			Manuelle Erstellung Bilder, Texte und Animationen	Automatisierte Bilderstellung	Automatisierte Erstellung Animation	Automatisierte Texterstellung		
1	Visual Assist	Bosch Rexroth AG	Ja	-	-	-	inaktiv	kommerziell
2	Assembly Pro	LAP Laser	-	-	-	-	aktiv	kommerziell
3	Der schlaue Klaus	Optimum	Ja	-	-	-	aktiv	kommerziell
4	Der Assistent	Sight Broc	Ja	-	-	-	aktiv	kommerziell
5	Elam Professional	Armbruster	-	-	-	-	aktiv	kommerziell
6	Smart Assist	MiniTec Smart Solutions GmbH	keine Animation	-	-	-	aktiv	kommerziell
7	Human Machine Interface Mate	Arkite B.V	Ja	-	-	-	aktiv	kommerziell
8	LP- HFD2	Z-Laser	-	-	-	-	aktiv	kommerziell
9	MotionEAP	Schnaithmann Maschinenbau; Uni Stuttgart	Ja	-	-	-	aktiv	Forschung
10	nexonar Real-Time Location System	soft2tec GmbH	keine Animation	-	-	-	aktiv	kommerziell
11	OptoInspect3D	Fraunhofer IFF	keine Animation	-	-	-	aktiv	Forschung
12	QualityAssist	Sarissa GmbH	-	-	-	-	aktiv	kommerziell
13	Assemblio Composer	Assemblio	Auf Basis CAD Daten	Ja	Ja	-	aktiv	kommerziell
14	Comupter Aided Works	iie	Ja	-	-	-	aktiv	kommerziell
15	Smart Assembly Trainer	Fraunhofer IOSB-INA	Ja	-	-	-	aktiv	Forschung
16	Kognitive Assistenzsysteme/ P2Light	Phoenix Mecano Solutions	keine Animation	-	-	-	aktiv	kommerziell
17	Assistenzsystem Desoutter	Desoutter	Ja	-	-	-	aktiv	kommerziell
18	T2C Assembly	Attenio	Auf Basis CAD Daten	Ja	-	-	aktiv	kommerziell

Tabelle A-2 bietet einen detaillierten Überblick über die Funktionen der in Tabelle A-1 aufgeführten KAS-Lösungen im Hinblick auf die Montageanweisungserstellung. Im Fokus steht dabei, ob die Systeme manuelle oder automatisierte Prozesse zur Erstellung von Texten, Bildern und Animationen unterstützen. Es zeigt sich, dass viele der Systeme auf manuelle Editoren zur Erstellung von Bild- und Textanweisungen setzen, während vollautomatisierte Verfahren, wie beispielsweise zur Erstellung von Textanweisungen oder Animationen, weniger verbreitet sind. Dies verdeutlicht den aktuellen Entwicklungsstand auf dem Markt und zeigt, dass die Automatisierung in der Montageanweisungserstellung noch nicht weit verbreitet ist.

Zusätzlich wird in der Tabelle auch der Status der jeweiligen Lösung dargestellt, so dass ersichtlich ist, ob das System noch aktiv auf dem Markt verfügbar ist oder nicht. Zudem wird angegeben, ob es sich um ein kommerzielles Produkt handelt oder die Lösung im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelt wurde.

B Anhang zu Kapitel 3

Tabelle B-1: Informationen zur systematischen Literaturrecherche im Themenfeld I: nutzeradaptive KAS

Kategorie	Details
Suchbegriff	((("Kognitiv*" OR "cognitive*") AND ("Assistenzsystem*" OR "assistance system*") AND ("Adaptiv*" OR "adaptive*" OR "individualisierbar*" OR "individualizable*" OR "personalisierbar*" OR "personalizable*") AND ("Montage*" OR "assembly*"))
Datenbanken	IEEE Explore, ScienceDirect, Springer Professional, Web of Science
Eignungskriterien	Veröffentlichungen zwischen 2014-2024, relevant in Bezug auf Forschungsfrage 1, neue oder signifikant verbesserte Ansätze im Vergleich zu bestehenden Lösungen, Einsatzbereich Montage, Deutsch oder Englisch
Auswahlverfahren/ Vorgehensweise	1. Titel prüfen 2. Abstract prüfen 3. Volltext prüfen 4. Vorwärts- und Rückwärtssuche

Tabelle B-2: Informationen zur systematischen Literaturrecherche im Themenfeld II: Erstellung und Strukturierung von Montageanweisungen

Kategorie	Details
Suchbegriff	((("Montageanweisung*" OR "assembly instruction*") AND ("Erstellung*" OR "creation*" OR "Generierung*" OR "generation*") AND ("Strukturierung*" OR "structuring*" OR "Aufbau*" OR "composition*") AND ("Datenmodell*" OR "data model*") AND ("Schablone*" OR "template*" OR "Muster*"))
Datenbanken	IEEE Explore, ScienceDirect, Springer Professional, Web of Science
Eignungskriterien	Veröffentlichungen zwischen 2000-2024, relevant in Bezug auf Forschungsfrage 2, neue oder signifikant verbesserte Ansätze im Vergleich zu bestehenden Lösungen, Einsatzbereich Montage, Deutsch oder Englisch
Auswahlverfahren/ Vorgehensweise	1. Titel prüfen 2. Abstract prüfen 3. Volltext prüfen 4. Vorwärts- und Rückwärtssuche

Die Verwendung von Trunkierungszeichen (*) ermöglicht es, nach verschiedenen Formen der Wörter zu suchen (z. B., "kognitiv" oder "kognitive", "Assistenzsystem" oder "Assistenzsysteme").

C Anhang zu Kapitel 5

Tabelle C-1: Aussortierte Prozesse mit Begründung (eigene Darstellung in Anlehnung an LUŠI17, S. 84)

ON	Prozess	Filterbegründung
Nach Normfamilie DIN 8593		
4.4.1	Ausgießen	Beim Ausgießen handelt es sich um ein Urformverfahren, bei dem flüssige Materialien in Formen gefüllt werden, um feste Bauteile zu erzeugen. Dieses Verfahren ist der Teilefertigung zugeordnet und steht in der Prozesskette vor oder nach der manuellen Montage.
4.4.2.1	Umspritzen	Umspritzen, Eingießen und Einvulkanisieren sind Verfahren, die der Teilefertigung zugeordnet werden können, da sie die Formgebung und stoffschlüssige Verbindung von Materialien beinhalten. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich Montageprozesse auf das mechanische oder chemische Zusammenfügen vorgefertigter Bauteile.
4.4.2.2	Eingießen	
4.4.2.3	Ein- vulkanisieren	
4.4.4	Ein- galvanisieren	Eingalvanisieren ist ein Verfahren, bei dem metallische Bauteile durch elektrochemische Ablagerung mit einer Zinkschicht überzogen werden, um Korrosionsschutz zu bieten. Dieses Verfahren ist der Teilefertigung zugeordnet und steht in der Prozesskette vor oder nach der manuellen Montage.
4.4.5	Ummanteln	Ummanteln ist ein Verfahren, bei dem Materialien wie Drähte mit einer schützenden Schicht umgeben werden, um ihre Stabilität und Beständigkeit zu erhöhen. Da dieser Prozess vollständig maschinell erfolgt und keinen manuellen menschlichen Eingriff erfordert, wird er nicht der manuellen Montage zugeordnet.
4.4.6	Kitten	Kitt ist ein pastenförmiges Klebe- und Dichtungsmittel, das auch als Füllstoff für Spalten und Löcher verwendet wird. Anders als bei klassischen Montageprozessen, die bereits geformte Teile zusammenfügen, wird beim Kitten eine neue Verbindung durch das Auftragen des Kitts geschaffen, der aushärtet und eine feste Masse bildet.
4.5.1.1	Drahtflechten	Das Herstellen von Drahtgeflechten, Seilen, Seilverbindungen und Knoten umfasst Verfahren, bei denen durch Verflechten oder Verweben von Materialien neue Verbindungen entstehen. Diese Prozesse sind kein üblicher Prozess innerhalb der Montage mechatronischer Produkte.
4.5.1.3	Verseilen	
4.5.1.4	Spleißen	
4.5.1.5	Knoten	
4.5.1.7	Drahtweben	Drahtweben ist ein Verfahren, bei dem Drähte rechtwinklig zueinander verflochten werden, um ein stabiles Gewebe zu erzeugen. Das Drahtweben erfolgt durch spezielle Webmaschinen und ist daher kein Teil der manuellen Montage.
4.6.1	Press- schweißen	Pressschweißen, Schmelzschweißen sowie Verbindungs-Weichlöten und Verbindungs-Hartlöten sind Verfahren, die üblicherweise von ausgebildeten Fachkräften durchgeführt werden, da sie präzise Kenntnisse über Materialeigenschaften und spezifische Techniken erfordern. Diese Fügeoperationen finden oft in speziellen Bereichen statt, um die Qualität und Sicherheit der Verbindungen zu gewährleisten. Da die Instanzen der manuellen Montage nicht immer über die erforderliche Qualifikation verfügen, werden diese Prozesse als separate Tätigkeiten betrachtet, um optimale Ergebnisse zu erzielen.
4.6.2	Schmelz- schweißen	
4.7.1	Verbindungs- Weichlöten	
4.7.2	Verbindungs- Hartlöten	
Nach Richtlinie VDI 2860		
2.1	Speichern	Die Prozesse Speichern, Mengen verändern und Bewegen werden nicht einbezogen, da sie Hilfsprozesse darstellen, die sich weder der Fügeoperation, der Zwischenoperation oder der Entahmeoperation zuordnen lassen. Sie sind zwar unterstützend für die Gesamtabläufe, stehen jedoch nicht im direkten Einflussbereich des Kognitiven Assistenzsystems.
2.2	Mengen verändern	
2.3	Bewegen	
2.5	Kontrollieren	Bei kognitiven Assistenzsystemen ist eine manuelle Kontrolle weitgehend überflüssig, da diese Systeme selbst eine fortlaufende Qualitätskontrolle und Dokumentation durchführen.
Inbetriebnehmen		
-	Passives Justieren	Beim Justieren wird zwischen aktivem und passivem Justieren unterschieden. Das aktive Justieren, bei dem Einstellungen mit Messmitteln vorgenommen werden, bleibt als Teil der manuellen Montage erhalten. Dieses aktive Justieren umfasst die gezielte Optimierung der Leistung oder Genauigkeit eines Geräts oder Systems durch einen qualifizierten Mitarbeiter unter Verwendung von Messinstrumenten. Das passive Justieren, bei dem Einstellungen ohne Messmittel automatisch vorgenommen werden, wird hingegen herausgefiltert.
-	Parametrieren	Parametrieren umfasst die Einstellung und Anpassung von Parametern in einem System oder einer Software. Dieser Prozess erfordert ein tiefes Verständnis der Systemfunktionen und kann komplexe Konfigurationen beinhalten. Da es sich um eine spezialisierte Aufgabe handelt, die oft von Systemingenieuren oder Programmierern durchgeführt wird, fällt sie nicht in den Bereich der typischen manuellen Montagetätigkeiten.
-	Funktions- prüfung	Die Funktionsprüfung ist ein wesentlicher Prozess zur Überprüfung der korrekten Funktion eines Systems oder Geräts. Sie erfordert spezifische Testverfahren und -equipment und wird häufig von speziell geschultem Personal durchgeführt. Daher wird die Funktionsprüfung als eigenständiger Schritt nach der manuellen Montage angesehen und nicht direkt in den Montageprozess integriert.

Tabelle C-2: Syntaxbausteine Montageprozesse Teil 1 (eigene Darstellung in Anlehnung an LUŠI17, S. 85–94)

		ON	Prozess	Vereinfachter Begriff	Zusammensetzung	Präposition
Fügeoperationen	DIN 8593-1	4.1.1	Auflegen	auflegen	-	auf
		4.1.2	Einlegen	einlegen	-	in
		4.1.3	Ineinanderschieben	einschieben	-	in/zwischen/ unter
		4.1.4	Einhängen	einhängen	-	in
		4.1.5	Einrenken	einschieben	4.1.2 or 4.1.3	in
		4.1.6	Federnd einspreizen	einklicken/einspreizen	4.1.2 or 4.1.3	in
	DIN 8593-2	4.2.1	Einfüllen	einfüllen	-	in
		4.2.2	Tränken/Imprägnieren	tränken	-	in
	DIN 8593-3	4.3.1	Schrauben	einschrauben	4.1.2	in
		4.3.2	Klemmen	zusammenklemmen	4.1.3	mit
		4.3.3	Klammern	zusammenklammern	4.1.1 or 4.1.3	mit
		4.3.4.1	Fügen durch Einpressen	einpressen	4.1.2 or 4.1.3	in
		4.3.4.2	Fügen durch Schrumpfen	einstecken	4.1.2 or 4.1.3	über
		4.3.4.3	Fügen durch Dehnen	einstecken	4.1.2 or 4.1.3	in
		4.3.5	Nageln/Einschlagen	einschlagen	4.1.1	in
		4.3.6	Verkeilen	verkeilen	4.1.2 or 4.1.3	in/im
		4.3.7	Verspannen	verspannen	4.1.3	mit
	DIN 8593-4	4.4.3	Vergießen	vergießen	(4.1.2 or 4.1.3) & 4.2.1	mit
	DIN 8593-5	4.5.1.2	Gemeinsames Verdrehen	zusammendrehen	-	mit
		4.5.1.6	Wickeln mit Draht	umwickeln	-	mit
		4.5.1.8	Heften	zusammenheften	4.1.1	-
		4.5.2.1	Fügen durch Körnen oder Kerben	einkerben, körnen	4.1.3	-
		4.5.2.2	Gemeinsames Fließpressen	pressen	4.1.3	mit
		4.5.2.3	Gemeinsames Ziehen	ziehen	4.1.3	mit
		4.5.2.4.1	Rohreinwalzen	walzen	4.1.3	mit
		4.5.2.4.2	Fügen durch Weiten mit Innendruck	weiten	4.1.3	mit
		4.5.2.5.1	Fügen durch Rundkneten	kneten	4.1.3	mit
		4.5.2.5.2	Fügen durch Einhalsen	verengen	4.1.3	an
		4.5.2.5.3	Fügen durch Sicken	verengen	4.1.3	an
		4.5.2.6	Fügen durch Bördeln	biegen	4.1.3	an
		4.5.2.7	Falzen	biegen	4.1.3	an
		4.5.2.8	Wickeln	wickeln	4.1.1	mit
		4.5.2.9	Verlappen	verbiegen	4.1.3	an
		4.5.2.10	Umformendes Einspreizen	biegen	4.1.2	an
		4.5.2.11	Durchsetzfügen	pressen	4.1.1	an
		4.5.2.12	Verpressen	verpressen	4.1.3	mit
		4.5.2.13	Quetschen	verquetschen	4.1.3	an
		4.5.3.1	Nieten	nieten	4.1.1 & 4.1.3	in
		4.5.3.2	Hohnieten	nieten	4.1.1 & 4.1.3	in
		4.5.3.3	Zapfnieten	nieten	4.1.1 & 4.1.3	in
		4.5.3.4	Hohlzapfnieten	nieten	4.1.1 & 4.1.3	in
		4.5.3.5	Zwischenzapfnieten	nieten	4.1.1 & 4.1.3	in
		4.5.3.6	Stanznieten	nieten	4.1.1 & 4.1.3	in
	DIN 8593-8	4.8.1.1	Nasskleben	verkleben	4.1.1 or 4.1.2	mit
		4.8.1.2	Kontaktkleben	verkleben	4.1.1 or 4.1.2	mit
		4.8.1.3	Aktivierkleben	verkleben	4.1.1 or 4.1.2	mit
		4.8.1.4	Haftkleben	verkleben	4.1.1 or 4.1.2	mit
		4.8.1.5	Reaktionskleben	verkleben	4.1.1 or 4.1.2	mit
	VDI 2860	2.4	Sichern	sichern	-	durch/mit
	Inbetrieb- nehmen	1	Aktives Justieren	messen	-	an
		2	Einspannen	einspannen	-	mit
selbst erstellte Prozesse	Hilfs- prozes- se	3	Verspannung lösen	lösen	-	von
		4	Dokumentieren	dokumentieren	-	in
		5	Drehen/Schwenken	drehen	-	um
		6	Scannen	scannen	-	mit
	Sonder- opera- tionen	7	Verpacken	verpacken	-	mit
		8	Beschriften	beschriften	-	mit

Tabelle C-3: Syntaxbausteine Montageprozesse Teil 2 (eigene Darstellung in Anlehnung an LUŠI17, S. 85–94)

ON	Vereinfachter Begriff	Betriebsmittel	Potentieller Zielparameter	Verbindungselement
4.1.1	auflegen	z.B. Manipulator	-	-
4.1.2	einlegen	z.B. Manipulator	-	-
4.1.3	einschieben	z.B. Manipulator	-	-
4.1.4	einhängen	z.B. Manipulator	-	-
4.1.5	einschieben	z.B. Druckwerkzeug	-	-
4.1.6	einklicken/einspreizen	z.B. Zange	-	-
4.2.1	einfüllen	z.B. Dosierer	Füllmenge [l]	-
4.2.2	tränken	-	Zeit [s]	-
4.3.1	einschrauben	z.B. Drehmomentschrauber	Drehmoment [Nm]	z.B. Schrauben, Muttern, Bolzen
4.3.2	zusammenklemmen	-	-	z.B. Rohrschelle
4.3.3	zusammenklammern	-	-	z.B. Drahtklammer
4.3.4.1	einpressen	z.B. Presse	Kraft [N]	-
4.3.4.2	einstecken	z.B. Zange	Temperatur [°C]	-
4.3.4.3	einstecken	z.B. Zange	Temperatur [°C]	-
4.3.5	einschlagen	z.B. Hammer	Kraft [N]	z.B. Nagel
4.3.6	verkeilen	-	-	z.B. Nabenkeil
4.3.7	verspannen	z.B. Hammer	Kraft [N]	-
4.4.3	vergießen	z.B. Behältnis	Temperatur [°C]	z.B. Gießharz
4.5.1.2	zusammendrehen	z.B. Zange	Kraft [N]	-
4.5.1.6	umwickeln	z.B. Zange	Kraft [N]	-
4.5.1.8	zusammenheften	z.B. Zange	-	-
4.5.2.1	einkerben, körnen	z.B. Hammer	Kraft [N]	-
4.5.2.2	pressen	z.B. Hammer	Kraft [N]	-
4.5.2.3	ziehen	z.B. Ziehring	Kraft [N]	-
4.5.2.4.1	walzen	-	Drehmoment [Nm]	-
4.5.2.4.2	weiten	z.B. Druckluftwerkzeug	Druck [N/mm²]	-
4.5.2.5.1	kneten	z.B. Presse	Kraft [N]	-
4.5.2.5.2	verengen	z.B. Presse	Kraft [N]	-
4.5.2.5.3	verengen	z.B. Presse	Kraft [N]	-
4.5.2.6	biegen	z.B. Zange	Kraft [N]	-
4.5.2.7	biegen	z.B. Zange	Kraft [N]	-
4.5.2.8	wickeln	z.B. Zange	Kraft [N]	-
4.5.2.9	verbiegen	z.B. Zange	Kraft [N]	-
4.5.2.10	biegen	z.B. Presse	Kraft [N]	-
4.5.2.11	pressen	z.B. Presse	Kraft [N]	-
4.5.2.12	verpressen	z.B. Presse	Kraft [N]	z.B. Presshülle
4.5.2.13	verquetschen	z.B. Crimpzange	Kraft [N]	-
4.5.3.1	nieten	Nietzange	Kraft [N]	Niete
4.5.3.2	nieten	Nietzange	Kraft [N]	Niete
4.5.3.3	nieten	Nietzange	Kraft [N]	Niete
4.5.3.4	nieten	Nietzange	Kraft [N]	Niete
4.5.3.5	nieten	Nietzange	Kraft [N]	Niete
4.5.3.6	nieten	Nietmaschine	Kraft [N]	Niete
4.8.1.1	verkleben	z.B. Klebepistole	Klebespalt [mm]	Klebmittel
4.8.1.2	verkleben	z.B. Klebepistole	Klebespalt [mm]	Klebmittel
4.8.1.3	verkleben	z.B. Klebepistole	Klebespalt [mm]	Klebmittel
4.8.1.4	verkleben	z.B. Klebepistole	Klebespalt [mm]	Klebmittel
4.8.1.5	verkleben	z.B. Klebepistole	Klebespalt [mm]	Klebmittel
2.4	sichern	z.B. Spannbänder	-	-
1	messen	z.B. Bügelmessschraube	fallabhängig	-
2	einspannen	z.B. Spannhebel	-	-
3	lösen	z.B. Spannhebel	-	-
4	dokumentieren	z.B. Stift	-	-
5	drehen	z.B. Drehhebel	Gradanzahl [°]	-
6	scannen	z.B. Scanner	-	-
7	verpacken	z.B. Hebevorrichtung	-	-
8	beschriften	z.B. Etikett	-	-

Tabelle C-4: Syntaxbausteine Warnungen

ON	vereinfachter Begriff	Warnungen	Plural
4.1.1	auflegen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Ja
4.1.2	einlegen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Ja
4.1.3	einschieben	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Einstecktiefe beachten	Ja
4.1.4	einhängen	Achtung: Herausfallen möglich und korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.1.5	einschieben	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten und Einstecktiefe beachten	Nein
4.1.6	einklicken/einspreizen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.2.1	einfüllen	Achtung: Korrekte Füllmenge beachten	Nein
4.2.2	tränken	Achtung: Korrekte Eintauchtiefe {Bauteil} beachten	Nein
4.3.1	einschrauben	Achtung: {Schrauben} korrekt anziehen	Ja
4.3.2	zusammenklemmen	Achtung: {Klemmen} korrekt verschließen	Ja
4.3.3	zusammenklammern	Achtung: {Klammern} korrekt anbringen	Ja
4.3.4.1	einpressen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Einpressdruck beachten	Nein
4.3.4.2	erwärmt einstecken	Achtung: Korrekte Temperatur {Bauteil} beachten	Nein
4.3.4.3	einstecken	Achtung: Korrekte Temperatur {Bauteil} beachten	Nein
4.3.5	einschlagen	Achtung: {Nagel} gerade einschlagen	Nein
4.3.6	verkeilen	Achtung: Korrekte Ausrichtung Keil beachten	Ja
4.3.7	verspannen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.4.3	vergießen	Achtung: Temperatur {Bauteil} beachten	Nein
4.5.1.2	zusammendrehen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.5.1.6	umwickeln	Achtung: Korrekte Wickelrichtung beachten	Ja
4.5.1.8	zusammenheften	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Ja
4.5.2.1	einkerben, körnen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Sauberkeit {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.2	pressen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.3	ziehen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Zugkraft beachten	Nein
4.5.2.4.1	walzen	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.4.2	weiten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.5.1	kneten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.5.2	verengen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Ja
4.5.2.5.3	verengen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Ja
4.5.2.6	biegen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Überbiegen beachten	Nein
4.5.2.7	biegen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Überbiegen beachten	Nein
4.5.2.8	wickeln	Achtung: Korrekte Wickelrichtung beachten	Nein
4.5.2.9	verbiegen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Überbiegen beachten	Nein
4.5.2.10	biegen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.11	pressen	Achtung: Quetschgefahr und korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.12	verpressen	Achtung: Quetschgefahr und korrekte Ausrichtung {Bauteil} beachten	Nein
4.5.2.13	verquetschen	Achtung: Korrekte Ausrichtung {Bauteil} und Sauberkeit {Bauteil} beachten	Nein
4.5.3.1	nieten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} und Niettiefe beachten	Ja
4.5.3.2	nieten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} und Niettiefe beachten	Ja
4.5.3.3	nieten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} und Niettiefe beachten	Ja
4.5.3.4	nieten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} und Niettiefe beachten	Ja
4.5.3.5	nieten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} und Niettiefe beachten	Ja
4.5.3.6	nieten	Achtung: Korrekte Position am {Bauteil} und Niettiefe beachten	Ja
4.8.1.1	verkleben	Achtung: Sauberkeit {Bauteil} und gleichmäßiges Auftragen Kleber beachten	Nein
4.8.1.2	verkleben	Achtung: Sauberkeit {Bauteil} und gleichmäßiges Auftragen Kleber beachten	Nein
4.8.1.3	verkleben	Achtung: Sauberkeit {Bauteil} und gleichmäßiges Auftragen Kleber beachten	Nein
4.8.1.4	verkleben	Achtung: Sauberkeit {Bauteil} und gleichmäßiges Auftragen Kleber beachten	Nein
4.8.1.5	verkleben	Achtung: Sauberkeit {Bauteil} und gleichmäßiges Auftragen Kleber beachten	Nein
2.4	sichern	Achtung: Sicherer und fester Halt {Bauteil} bei Entnahme beachten	Ja
1	messen	Achtung: Korrekte Messposition {Bauteil} beachten	Ja
2	einspannen	Achtung: Kontrolliertes und sicheres Einspannen beachten	Ja
3	lösen	Achtung: Kontrolliertes und sicheres Lösen der {Verspannungen} beachten	Ja
4	dokumentieren	Achtung: Vollständige und sorgfältige Dokumentation gewährleisten	Nein
5	drehen	Achtung: Korrekte Einspannung und Drehgeschwindigkeit beachten	Nein
6	scannen	Achtung: Korrekte Position {Bauteil} und Lesbarkeit Barcode beachten	Ja
7	verpacken	Achtung: Packmittel auf Schäden prüfen	Ja
8	beschriften	Achtung: Klar und deutliche Kennzeichnung beachten	Nein

Tabelle C-5: Syntaxbausteine Fehlermeldungen

ON	vereinfachter Begriff	potentielle Fehlermeldungen	Plural
4.1.1	auflegen	Stopp: {Bauteil} falsch aufgelegt -> {Bauteil} drehen!	Ja
4.1.2	einlegen	Stopp: {Bauteil} falsch eingelegt -> {Bauteil} drehen!	Ja
4.1.3	einschieben	Stopp: Einstecktiefe falsch -> Einstecktiefe korrigieren! Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Ja
4.1.4	einhängen	Stopp: {Bauteil} rausgefallen -> {Bauteil} erneut einhängen! Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Nein
4.1.5	einschieben	Stopp: Einstecktiefe unzureichend -> Einstecktiefe ändern! Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Nein
4.1.6	einklicken/einspreizen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} korrigieren!	Nein
4.2.1	einfüllen	Stopp: Füllmenge falsch -> Einfüllmenge korrigieren!	Nein
4.2.2	tränken	Stopp: Eintauchtiefe falsch -> Eintauchtiefe anpassen!	Nein
4.3.1	einschrauben	Stopp: Verschraubung außerhalb der Toleranz -> {Schrauben} mit {Betriebsmittel} mit {Wert} [Nm] in {Bauteil} einschrauben!	Ja
4.3.2	zusammenklemmen	Stopp: {Klemmen} falsch verschlossen -> zusammenklemmen korrigieren!	Ja
4.3.3	zusammenklammern	Stopp: {Klammern} falsch verschlossen -> zusammenklammern korrigieren!	Ja
4.3.4.1	einpressen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen! Stopp: Einpresskraft falsch -> Einpresskraft anpassen!	Nein
4.3.4.2	erwärmt einstecken	Stopp: Temperatur falsch -> Temperatur auf {Wert} [°C] anpassen!	Nein
4.3.4.3	einstecken	Stopp: Temperatur falsch -> Temperatur auf {Wert} [°C] anpassen!	Nein
4.3.5	einschlagen	Stopp: {Nagel} krumm eingeschlagen -> {Nagel} entfernen und neuen {Nagel} erneut einschlagen! Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Nein
4.3.6	verkeilen	Stopp: {Keil} falsch ausgerichtet -> {Keil} Ausrichtung anpassen!	Ja
4.3.7	verspannen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen! Stopp: {Spannbau teil} falsch verschlossen -> verspannen korrigieren!	Nein
4.4.3	vergießen	Stopp: Temperatur falsch -> Temperatur anpassen!	Nein
4.5.1.2	zusammendrehen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Nein
4.5.1.6	unwickeln	Stopp: Wickelrichtung falsch -> Wickelrichtung anpassen!	Ja
4.5.1.8	zusammenheften	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Ja
4.5.2.1	einkerben, kören	Stopp: Tiefe Kerbe unzureichend -> Tiefe ändern! Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> neues {Bauteil} nehmen!	Nein
4.5.2.2	pressen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Nein
4.5.2.3	ziehen	Stopp: {Bauteil} falsch gezogen -> {Bauteil} erneut ziehen!	Nein
4.5.2.4.1	walzen	Stopp: Position falsch -> Neues {Bauteil} verwenden und Vorgang an richtiger Position wiederholen!	Nein
4.5.2.4.2	weiten	Stopp: Position falsch -> Neues {Bauteil} verwenden und Vorgang an richtiger Position wiederholen!	Nein
4.5.2.5.1	kneten	Stopp: Position falsch -> Neues {Bauteil} verwenden und Vorgang an richtiger Position wiederholen!	Nein
4.5.2.5.2	verengen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Ja
4.5.2.5.3	verengen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Ja
4.5.2.6	biegen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen! Stopp: Überbiegung falsch -> Überbiegung anpassen!	Nein
4.5.2.7	biegen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen! Stopp: Überbiegung falsch -> Überbiegung anpassen!	Nein
4.5.2.8	unwickeln	Stopp: Wickelrichtung falsch -> Wickelrichtung anpassen!	Nein
4.5.2.9	verbiegen	Stopp: Überbiegung falsch -> Überbiegung anpassen! Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen!	Nein
4.5.2.10	biegen	Stopp: {Bauteil} falsch ausgerichtet -> {Bauteil} drehen! Stopp: Überbiegung falsch -> Überbiegung anpassen!	Nein
4.5.2.11	pressen	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern!	Nein
4.5.2.12	verpressen	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern!	Nein
4.5.2.13	verquetschen	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern!	Nein
4.5.3.1	nieten	Stopp: Niettiefe unzureichend -> andere Niete nehmen!	Ja
4.5.3.2	nieten	Stopp: Niettiefe unzureichend -> andere Niete nehmen!	Ja
4.5.3.3	nieten	Stopp: Niettiefe unzureichend -> andere Niete nehmen!	Ja
4.5.3.4	nieten	Stopp: Niettiefe unzureichend -> andere Niete nehmen!	Ja
4.5.3.5	nieten	Stopp: Niettiefe unzureichend -> andere Niete nehmen!	Ja
4.5.3.6	nieten	Stopp: Niettiefe unzureichend -> andere Niete nehmen!	Ja
4.8.1.1	verkleben	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern! Stopp: Kleber ungleichmäßig aufgetragen -> Kleber verteilen!	Nein
4.8.1.2	verkleben	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern! Stopp: Kleber ungleichmäßig aufgetragen -> Kleber verteilen!	Nein
4.8.1.3	verkleben	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern! Stopp: Kleber ungleichmäßig aufgetragen -> Kleber verteilen!	Nein
4.8.1.4	verkleben	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern! Stopp: Kleber ungleichmäßig aufgetragen -> Kleber verteilen!	Nein
4.8.1.5	verkleben	Stopp: Sauberkeit {Bauteil} unzureichend -> {Bauteil} säubern! Stopp: Kleber ungleichmäßig aufgetragen -> Kleber verteilen!	Nein
2.4	sichern	Stopp: Entnahmeort falsch -> Entnahmeort ändern!	Ja
1	messen	Stopp: Messposition {Bauteil} falsch -> Messung an richtiger Position wiederholen! Stopp: Messposition vergessen -> fehlende Messung durchführen!	Ja
2	einspannen	Stopp: {Bauteil} falsch eingespannt -> {Bauteil} richtig einspannen! Stopp: {Spannbau teil} vergessen -> {fehlendes Spannbau teil} schließen!	Ja
3	lösen	Stopp: {Spannbau teil} falsch gelöst -> {Spannbau teil} richtig lösen!	Ja
4	dokumentieren	Stopp: Dokumentation unzureichend -> Dokumentation vervollständigen!	Nein
5	drehen	Stopp: {Bauteil} falsch eingespannt -> {Bauteil} richtig einspannen! Stopp: Drehgeschwindigkeit zu schnell -> Drehgeschwindigkeit verlangsamen!	Nein
6	scannen	Stopp: Barcode unlesbar -> Barcode ersetzen! Stopp: Position Barcode falsch -> Vorgang an richtiger Position wiederholen!	Ja
7	verpacken	Stopp: Packmittel fehlerhaft -> neues Packmittel entnehmen!	Ja
8	beschriften	Stopp: Kennzeichnung undeutlich -> Beschriftung anpassen!	Nein

D Anhang zu Kapitel 6

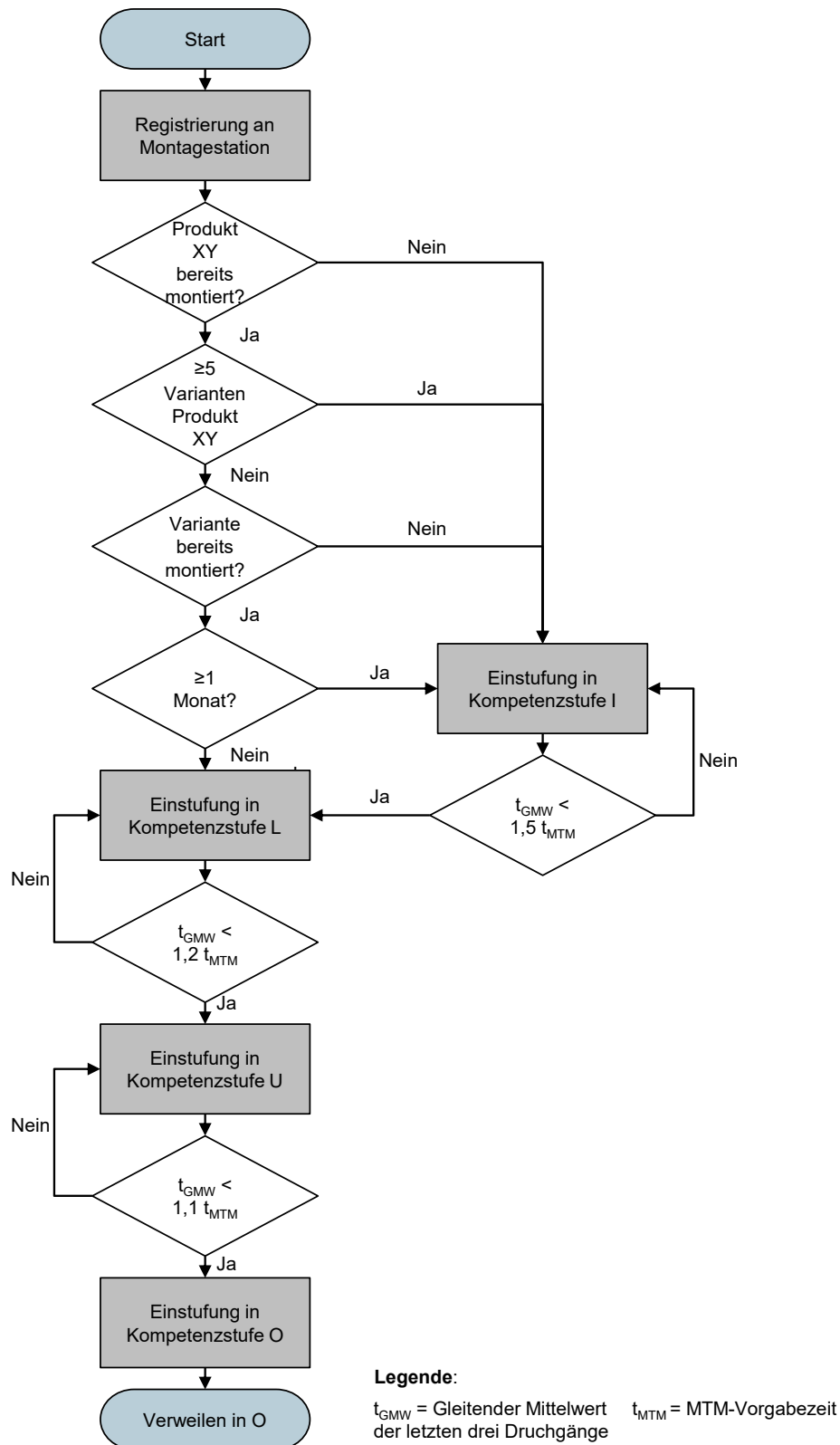


Abbildung D-1: Ablaufdiagramm zur dynamischen Kompetenzstufenzuweisung innerhalb des Recommender-Systems

E Anhang zu Kapitel 7

Tabelle E-1: Vergleich Zeiten zur Erstellung von Montageanweisungen

Proband	Power Point Maske [min]	AIG [min]
P01	4,59	1,05
P02	4,17	1,33
P03	3,89	1,09
P04	4,02	1,14
P05	3,75	1,13
MW	4,08	1,15
Differenz	2,93	

Fragebogen zur Erfassung der kognitiven Beanspruchungshöhe

Geben Sie für jede der untenstehenden Dimensionen an, wie hoch die Beanspruchung war. Markieren Sie dazu bitte auf den folgenden Skalen, in welchem Maße Sie sich in den sechs genannten Dimensionen von der Aufgabe beansprucht oder gefordert gesehen haben:

Beispiel:

Gering

Hoch

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
					x														

Geistige Anforderung

Wie viel geistige Anstrengung war bei der Informationsaufnahme und -verarbeitung erforderlich (z. B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen...)?

Gering

Hoch

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Körperliche Anforderung

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?

Gering

Hoch

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Zeitliche Anforderungen

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt, mit dem Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Abfolge langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?

Gering

Hoch

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Leistung

Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht?

Gut

Schlecht

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?

Gering

Hoch

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?

Gering

Hoch

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Abbildung E-1: NASA-RTLX-Fragebogen (eigene Darstellung in Anlehnung an HART06)

Fragebogen zur System-Gebrauchstauglichkeit					
Dieser Fragebogen basiert auf dem System Usability Scale (SUS) und dient dazu, die Gebrauchstauglichkeit des kognitiven Assistenzsystems zu evaluieren. Bitte bewerten Sie die folgenden Aussagen basierend auf Ihrer Erfahrung mit dem System.	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme eher nicht zu	Neutral	Stimme eher zu	Stimme voll zu
	1	2	3	4	5
1. Ich denke, dass ich das System gerne häufig benutzen würde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Ich fand das System unnötig komplex.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Ich fand das System einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um das System benutzen zu können.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in diesem System waren gut integriert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Ich denke, das System enthielt zu viele Inkonsistenzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit diesem System sehr schnell lernen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Ich fand das System sehr umständlich zu nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung des Systems sehr sicher.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte das System zu verwenden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung E-2: SUS-Fragebogen (eigene Darstellung in Anlehnung an BROO96)

Fragebogen zur Technologieakzeptanz						
Dieser Fragebogen basiert auf dem Technology Acceptance Model (TAM) und dient dazu, die Akzeptanz des Kognitiven Assistenzsystems zu evaluieren. Bitte bewerten Sie die folgenden Aussagen basierend auf Ihrer Erfahrung mit dem System.		Stimme überhaupt nicht zu	Stimme eher nicht zu	Neutral	Stimme eher zu	Stimme voll zu
		1	2	3	4	5
PU	1. Die Nutzung des Assistenzsystems verbessert meine Arbeitsleistung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Das System macht meine Montagearbeit effizienter.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Das System erhöht meine Produktivität bei der Montage.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4. Ich halte das Assistenzsystem für nützlich bei der Durchführung von Montageaufgaben.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PEOU	5. Die projizierten Anweisungen des Systems sind leicht verständlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	6. Die Bedienung des Assistenzsystems ist unkompliziert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	7. Die Reduktion der Anweisungstiefe entsprechend meiner Kompetenzstufe fühlt sich intuitiv an.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	8. Es ist einfach, die projizierten Inhalte während der Montage zu nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ATU	9. Die Nutzung des Assistenzsystems macht mir Spaß.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	10. Ich empfinde es als angenehm, mit dem Assistenzsystem zu arbeiten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	11. Insgesamt bin ich zufrieden mit dem projektionsbasierten Assistenzsystem.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
BI	12. Ich plane, das Assistenzsystem in Zukunft weiterhin zu nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	13. Ich würde dieses System anderen für Montageaufgaben empfehlen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung E-3: TAM-Fragebogen (eigene Darstellung in Anlehnung an DAVI89)

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation wurden in den Jahren 2022 bis 2025 am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) bzw. am Lehrstuhl für Montagesysteme der Universität des Saarlandes (UdS) unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Betreuung durch den Verfasser die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten durchgeführt.

- | | |
|-------------|--|
| Maffert, J. | <i>Entwicklung einer Methode zur Bedarfsbestimmung von Kognitiven Assistenzsystemen und einer dazugehörigen Taxonomie, Seminararbeit, 2023.</i> |
| Maffert, J. | <i>Entwicklung einer Methodik zur Bedarfsbestimmung Kognitiver Assistenzsysteme und Strukturierung von Arbeitsanweisungen in der manuellen Montage, Bachelorarbeit, 2023</i> |
| Bächle, C. | <i>Potenziäle modularer H2-Microgrids, Marktrecherche, Use-Case-basierte Bedarfsanalyse und Konzeption modularer Systemansätze, Masterarbeit, 2025</i> |
| Jochum, S. | <i>Automatisierte Generierung standardisierter Textanweisungen für kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage, Masterarbeit, 2025</i> |

Publikationsliste

Huebner, M.; Adler, F.; **Kelm, B.**; Blum, A.; Mueller, R.: Konzeptionierung eines Methodenbaukastens zur Automatisierungsempfehlung auf Grundlage einer potentialbasierten Montageprozessbewertung. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): Transformation by automation. Automation 2023: 24. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik, Baden-Baden, Deutschland, 27-28 Juni 2023. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2023, S. 1047–1060

Hueber, M.; **Kelm, B.**; Adler, F.; Blum, A.; Mueller, R.: Conception of a Flexible Modular Method for Automation Recommendation on the Basis of a Potential-Based Assembly Process Evaluation. In: Ihlenfeldt, S.; Schüppstuhl, T.; Tracht, K. (Hrsg.): Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2023. 1. Aufl. Cham: Springer, 2025, S. 75–86

Kelm, B.; Haas, P. H.; Margies, L.; Mueller, R.: Entwicklung eines Konzepts zur Nutzeradaptivität Kognitiver Assistenzsysteme am Beispiel der manuellen Montage von Brennstoffzellenstackkomponenten. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeitswissenschaft in-the-loop: Mensch-Technologie-Integration und ihre Auswirkung auf Mensch, Arbeit und Arbeitsgestaltung, Stuttgart, 06-08 März 2024. Sankt Augustin: GFA-Press, 2024, S. Beitrag D.2.3

Haas, P. H.; **Kelm, B.**; Margies, L.; Müller, R.: Development of an Adaptive Human-centered Work Station for Fuel Cell Stack Assembly. In: Procedia CIRP. Jg. 127, 2024, S. 32–37

Haas, P. H.; **Kelm, B.**; Margies, L.; Mueller, R.: Entwicklung eines nutzendenspezifisch kompetenzbasierten Recommender-Systems zur menschenzentrierten Adaption von Montagesystemparametern. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit, Aachen, Deutschland, 25-27 März 2025. Sankt Augustin: GFA-Press, 2025, S. 54-59

Kelm, B.; Haas, P. H.; Margies, L.; Mueller, R.: Evaluierung eines Kompetenzstufenmodells zur Evaluierung eines Kompetenzstufenmodell zur Nutzeradaptivität Kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit, Aachen, Deutschland, 25-27 März 2025. Sankt Augustin: GFA-Press, 2025, S. 87-92

Kelm, B.; Haas, P. H.; Jochum, S.; Margies, L.; Mueller, R.: Enhancing Assembly Instruction Generation for Cognitive Assistance Systems with Large Language Models. In: Procedia CIRP. Jg. 134, 2025, S. 7–12

Angenommen:

Kelm, B.; Margies, L. Haas, P. H.; Zimmer, S.; Mueller, R.: Design and Implementation of a Scalable and Flexible Assembly System for Fuel Cell Stacks. In: IEEE explore (Hrsg.): Conference of Production Technologies and Systems for E-Mobility, Karlsruhe, Deutschland, 8th-9th October, 2025, S. in-print

Haas, P. H.; **Kelm, B.;** Bashir, A.; Mueller, R.: Ein menschspezifisch adaptionsfähiges Montagesystem auf der Basis sensorischer Mitarbeitendenerfassung in der Montage von Brennstoffzellenstackkomponenten. In: Mueller, R.; Bashir, A. (Hrsg.): Assistenzsysteme in der Produktion und Montage. München: Hanser, 2025, S. in-print

Kelm, B.; Haas, P. H.; Bashir, A.; Mueller, R.: Automatisierte Generierung standardisierter Montageanweisungen für Kognitive Assistenzsysteme mithilfe eines Large Language Models: Ein syntaktischer Ansatz. In: Mueller, R.; Bashir, A. (Hrsg.): Assistenzsysteme in der Produktion und Montage. München: Hanser, 2025, S. in-print

Haas, P. H.; **Kelm, B.;** Margies, L.; Mueller, R.: Development of a Software Framework for the Recommender System-based Human-centered Adaptation of Manual Work Stations. In: CIRP (Hrsg.): 19th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering: Innovative and Cognitive Production Technologies, Naples, Italy, 16th-18th July 2025. Procedia CIRP, 2025, S. in-print