

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Lukas Andreas Merkel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Die Dissertation wurde am 09.09.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.04.2021 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Forschungsmethodisches Vorgehen.....	3
1.4 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen.....	7
2.1 Übersicht	7
2.2 Manuelle Montage	7
2.2.1 Begriffsklärung.....	7
2.2.2 Gestaltung variantenreicher Montagesysteme.....	9
2.2.3 Grundsätze zukünftiger Montageeinrichtungen	13
2.3 Kognitive Assistenzsysteme	14
2.3.1 Begriffsklärung.....	14
2.3.2 Etablierte Technologien.....	16
2.3.3 Zukünftige Technologien	18
2.4 Arbeitswissenschaft	20
2.4.1 Begriffsklärung.....	20
2.4.2 Gestaltung von Arbeitssystemen	21
2.4.3 Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme	22

2.5	Fazit.....	24
3	Stand der Forschung und Technik.....	25
3.1	Übersicht.....	25
3.2	Komplexitätsbewertung in der manuellen Montage.....	25
3.2.1	Komplexitätstreiber in der Produktion.....	25
3.2.2	Modellierung von Komplexität in der manuellen Montage.....	26
3.2.3	Bewertung des Assistenzbedarfs in der manuellen Montage.....	28
3.3	Klassifizierung kognitiver Assistenzsysteme	29
3.3.1	Autonomiegrad von Assistenz	29
3.3.2	Typologien kognitiver Assistenzsysteme im Produktionsumfeld....	30
3.4	Akzeptanz kognitiver Assistenzsysteme.....	32
3.4.1	Akzeptanzdimensionen und Mitarbeiterpartizipation	32
3.4.2	Bewertungsmodelle für Technologieakzeptanz und Gebrauchstauglichkeit.....	34
3.5	Auswahlverfahren für kognitive Assistenzsysteme.....	36
3.5.1	Durchgängige Mitarbeiterinformation nach LANG (2007).....	36
3.5.2	Werkerassistenz und -qualifizierung durch Visualisierung nach POSTAWA (2014).....	37
3.5.3	Montageführende Werkerinformation nach LUŠIĆ ET AL. (2016)....	38
3.5.4	Reifegradmodelle für interaktive Assistenzsysteme nach WILLEKE & KASSELMANN (2016)	39
3.5.5	Informationsassistenz in der Montage nach AEHNELT (2017).....	39
3.5.6	Methodische Assistenzsystemauswahl nach HOLD ET AL. (2017) ...	40
3.5.7	Assistenzsysteme in der Montage nach KLEINEBERG ET AL. (2017)	41
3.5.8	Individuelle Mitarbeiterbefähigung durch adaptive Assistenz nach BREITKOPF (2018).....	42

3.5.9	Gegenüberstellung der Auswahlverfahren	43
3.6	Ableitung des Handlungsbedarfs	45
4	Anforderungen an die Methode	47
5	Systemmodell für kognitive Assistenzsysteme	49
5.1	Übersicht	49
5.2	Gesamtdarstellung des Systemmodells	49
5.3	Beschreibung der Systemelemente	52
5.3.1	Assistenzsystem	52
5.3.2	Komponenten	52
5.3.3	Technologien	53
5.3.4	Fähigkeiten	54
5.4	Fazit	54
6	Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen	55
6.1	Übersicht	55
6.2	Gesamtdarstellung des Informationsflussmodells	55
6.3	Beschreibung der Systemelemente	57
6.3.1	Kognitives Assistenzsystem	57
6.3.2	Montagemitarbeiter	57
6.3.3	IT-Systeme	57
6.3.4	Montagearbeitsplatz	58
6.3.5	Ableitung von Grundtypen	58
6.4	Grundtypen kognitiver Assistenzfunktionen	59
6.4.1	Werkerinformation	59
6.4.2	Manuelle Dokumentation	60

6.4.3	Produktaktualisierung	60
6.4.4	Automatisierte Dokumentation	60
6.4.5	Qualitätssicherung	61
6.4.6	Manuelle Produktbeschreibung	61
6.5	Abgeleitete Fähigkeiten	62
6.5.1	Vorgehen zur Fähigkeitendefinition	62
6.5.2	Informationsflüsse mit Montagemitarbeiter	64
6.5.3	Informationsflüsse mit IT-Systemen	65
6.5.4	Informationsflüsse mit Montagearbeitsplatz	66
6.6	Fazit	67
7	Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage	69
7.1	Übersicht	69
7.2	Bedarfsanalyse	71
7.2.1	Übersicht	71
7.2.2	Beschreibung von Prozessschritten	71
7.2.3	Bewertung von Komplexitätsdimensionen	72
7.2.4	Auswahl von Grundtypen für Assistenzfunktionen	76
7.2.5	Abschätzung des Kostenrahmens	77
7.3	Partizipative Technologievorauswahl	77
7.3.1	Übersicht	77
7.3.2	Auswahl von Technologien und Planung der Erprobung	78
7.3.3	Ablauf der Erprobung alternativer Technologien vor Ort	79
7.3.4	Aufnahme und Auswertung von Nutzerfeedback	81
7.4	Konzeptionierung von Assistenzfunktionen	83

7.4.1	Übersicht.....	83
7.4.2	Formulierung von Assistenzfunktionen als User Story.....	83
7.4.3	Spezifizierung und Priorisierung der Assistenzfunktionen	84
7.4.4	Ableitung alternativer Konzepte	88
7.5	Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen	90
7.5.1	Übersicht.....	90
7.5.2	Anwendungsfallspezifische Anpassung der Technologie- und Komponentendatenbank	90
7.5.3	Kostenbasierte Optimierung.....	94
7.5.4	Analyse ungenutzter Fähigkeiten	96
7.5.5	Budgetabgleich und Reduzierung von Alternativen	96
7.6	Wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen	97
7.6.1	Übersicht.....	97
7.6.2	Quantitative Wirtschaftlichkeitsbewertung	98
7.6.3	Qualitative Wirtschaftlichkeitsbewertung	101
7.6.4	Systemvergleich und -auswahl.....	102
7.7	Fazit.....	105
8	Prototypische Umsetzung und Validierung	107
8.1	Übersicht	107
8.2	Technische Umsetzung	107
8.2.1	Allgemeines.....	107
8.2.2	Mobiler Montagearbeitsplatz	108
8.2.3	Technologie- und Komponentendatenbank.....	111
8.2.4	Optimierungstool zur Komponentenauswahl.....	113
8.3	Validierung.....	114

Inhaltsverzeichnis

8.3.1	Vorgehensweise der Validierung	114
8.3.2	Beschreibung des Anwendungsfalls	115
8.3.3	Ermittelte Bedarfe	117
8.3.4	Ergebnisse der partizipativen Technologievorauswahl.....	118
8.3.5	Konzipierte Assistenzfunktionen	121
8.3.6	Generierte Assistenzsystemlösungen	124
8.3.7	Wirtschaftliche Systembewertung	126
8.4	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	129
8.4.1	Anforderungsbezogene technische Bewertung.....	129
8.4.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	131
8.5	Fazit.....	134
9	Zusammenfassung und Ausblick	137
9.1	Zusammenfassung	137
9.2	Ausblick	139
10	Literaturverzeichnis	141
11	Anhang.....	165
11.1	Fragebogen der partizipativen Technologievorauswahl.....	165
11.2	Komplexitätsbewertung der Validierung.....	172
11.3	Fragebogenergebnisse der Validierung	173
11.4	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	175

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
AHP	Analytic Hierarchy Process
AP	Arbeitsplatz in der Montage
AR	Augmented Reality
ARA	Assistenz-Relevanz-Analyse
AutoID	Automatisierte Identifikation
AV	Augmented Virtuality
CAD	computer-aided design
CXI	CompleXity Index
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ERP	Enterprise Resource Planning
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
IFA	Institut für Fabrikanlagen und Logistik
IGCV	Fraunhofer Einrichtung für Gießerei, Composite und Verarbeitungstechnik
IPMT	Institut für Produktionsmanagement und -technik
ISO	International Organization for Standardization
JIT	Just in time
KA	Kognitives Assistenzsystem
MA	Montagemitarbeiter
MES	Manufacturing Execution System

Abkürzungsverzeichnis

MTM	methods-time measurement
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NFC	Near Field Communication
OCC	operator choice complexity
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PPZ	Prozessprioritätszahl
PT	Personentage
QFD	Quality Function Deployment
RFID	radio-frequency identification
RGB	Farbraum mit den Grundfarben Rot, Grün und Blau
SOAR	State, Operator and Result (kognitive Architektur)
Stk	Stück
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TPB	Theory of Planned Behavior
TRA	Theory of Reasoned Action
TRL	Technology Readiness Level
UML	Unified Modeling Language
UTAUT	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network
WZL	Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
AEF		Änderungsfrequenz
AW		Auftretenswahrscheinlichkeit
DA		Dokumentationsaufwand
DB		Dokumentationsbedarf
DK		Durchführungskomplexität
DOK		Dokumentationskomplexität
EW		Entdeckungswahrscheinlichkeit
$f_{i,j}^a$		Binäres Fähigkeitenangebot für Fähigkeit j in Komponente i
$f_{n,j}^b$		Binärer Fähigkeitenbedarf für Fähigkeit j in Assistenzsystem n
i		Laufindex für Komponenten
IG		Individualisierungsgrad
I_{max}		Maximale Komponentenzahl
IW		Informationswert
j		Laufindex für Fähigkeiten
J_{max}		Maximale Fähigkeitenanzahl
K_i	EUR	Kosten der Komponente i
K_n	EUR	Kosten des Assistenzsystems n
MQ		Mitarbeiterqualifikationsfaktor
n		Laufindex für konzipierte Assistenzsystemlösungen
n_{kann}		Anzahl konzipierter Kann-Assistenzfunktionen

Verzeichnis der Formelzeichen

N_{max}	<i>Anzahl der konzipierten Assistenzsystemlösungen</i>
$n_{möglich}$	<i>Anzahl kombinatorisch möglicher Assistenzfunktionen</i>
n_{muss}	<i>Anzahl konzipierter Muss-Assistenzfunktionen</i>
SH	<i>Schadenshöhe</i>
WK	<i>Wahrnehmungskomplexität</i>
$x_{i, n}$	<i>Binäre Entscheidungsvariable zur Verwendung von Komponente i in Assistenzsystem n</i>

Hinweis: Aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit bei Personenbezeichnungen die männliche Form gewählt, es ist jedoch immer die weibliche Form gemeint.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Eine durch vier deutsche produktionstechnische Institute¹ unter 123 produzierenden Unternehmen durchgeführte Studie zeigt, dass bereits 73 % der befragten Unternehmen u.a. die Auftragsabwicklungsstrategie Make-to-Order verfolgen (NYHUIS 2018). Zusätzlich führen der Trend zu individualisierten Produkten (REINHART & ZÜHLKE 2017) und der Fachkräftemangel (BISCHOFF 2015) zu einer Komplexitätserhöhung in der Produktion. Stückzahlschwankungen (ABELE & REINHART 2011) sowie steigende Produktkomplexität (SCHUH 2005) verstärken diesen Trend.

Unternehmen, die die Herstellung individueller Produkte beherrschen, können Skaleneffekte, Einzigartigkeit und eine Risikominderung gleichzeitig erreichen (EVERSHEIM & SCHUH 2003). Jedoch ergeben sich erhöhte Qualifikationsanforderungen an Mitarbeiter durch wechselnde Tätigkeiten bei schwankenden Mengenbedarfen (GROBE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004). Diese steigenden Anforderungen an die Qualifizierung von Mitarbeitern treffen auf den vorhandenen Fachkräftemangel, was zu Problemen in Form von Personalengpässen führt (BISCHOFF 2015). Die wachsende Produktkomplexität erhöht zudem die Qualitätskosten in der Produktion (SCHUH 2005).

Innerhalb der Produktion fällt dabei der Montage eine besondere Bedeutung zu, da hier von allen Unternehmensbereichen mit 50 % (PFEIFFER 1989) bzw. bis zu 70 % (GAIROLA 1981) der höchste Anteil an Kosten verursacht wird. Innerhalb der Montage ist das Personal neben Fläche, Betriebsmittel, Material und Information diejenige Ressource mit der höchsten Flexibilität (EVERSHEIM 1996). Zudem ist die menschliche Flexibilität unverzichtbar, um die Anforderungen personalisierter Produkte erfüllen zu können (BAUERNHANS ET AL. 2016). Die manuelle Montage bietet daher gegenüber der halb- und vollautomatischen Montage die höchste Flexibilität (LOTTER 2012A). In einer Studie beschreiben 42,8 % von 661 befragten Unternehmen ihre Produktion als manuell (SPATH ET AL. 2013). Dies zeigt, dass viele Unternehmen weiterhin durch manuelle Prozesse geprägt sind.

¹ Institut für Fabrikanlagen und Logistik IFA (Hannover), Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV (Augsburg), Institut für Produktionsmanagement und -technik IPMT (Hamburg), Werkzeugmaschinenlabor WZL (Aachen)

1 Einleitung

Zur Unterstützung der Mitarbeiter werden in der Produktion vermehrt Assistenzsysteme eingesetzt (APT ET AL. 2018A). In der manuellen Montage können Assistenzsysteme die Produktivität erhöhen (HINRICHSSEN & BENDZIOCH 2018). Eine Unterstützung im Wahrnehmen und Entscheiden über die Arbeitsaufgabe können Mitarbeiter durch kognitive Assistenzsysteme erhalten (BENGLER ET AL. 2017). Intelligente Assistenzsysteme ermöglichen Mitarbeitern, sich auf die kreativen, wertschöpfenden Tätigkeiten zu konzentrieren und entlasten sie von Routineaufgaben (KAGERMANN ET AL. 2003). Assistenzsysteme können darüber hinaus den Fachkräftemangel abmildern, indem sie älteren Arbeitnehmern das Arbeiten erleichtern und dadurch eine längere Lebensarbeitszeit ermöglichen (KAGERMANN 2017). Zudem können Assistenzsysteme Arbeitsabläufe effizienter und fehlersicherer gestalten (GÜNTNER ET AL. 2017). In empirischen Studien haben FASTBERGLUND ET AL. (2013) nachgewiesen, dass mit kognitiver Unterstützung Montagefehler reduziert werden können. Eine breite Qualifizierung von Mitarbeitern ist notwendig, um die für schwankende Absatzmärkte benötigte Personalflexibilität zu ermöglichen (SPATH ET AL. 2013).

Bei der Einführung von Assistenzsystemen sind unterschiedliche Autonomiegrade möglich. Diese reichen von einer Information des Mitarbeiters über das Arbeitsziel, die Integration situationsspezifischer Informationen bis hin zu automatisiertem Feedback bzgl. des Arbeitsergebnisses (WANDKE 2005). Weiterhin ist es notwendig, Mitarbeitern im Rahmen des Einführungsprozesses unbegründete Ängste zu nehmen (LANZA ET AL. 2018). Dies kann durch eine frühe Einbindung der Mitarbeiter in den Einführungsprozess des Assistenzsystems erfolgen. Zudem existieren auf dem Markt eine Vielzahl verschiedener technologischer Komponenten, die eine Mitarbeiterunterstützung ermöglichen (HINRICHSSEN ET AL. 2016). Mit Entwicklungen wie Gamification (KERBER & LESSEL 2015) und Augmented Reality (AR) (PATRON 2004, KÖNIG ET AL. 2019) nimmt die Technologievielfalt weiter zu. Auch ist die Wirtschaftlichkeit ein relevanter Faktor bei der Einführung kognitiver Assistenzsysteme. Neben Zeit- und Kostenersparnis sowie einer Verbesserung der Zuverlässigkeit der Produktion entstehen auch Implementierungs- und Trainingskosten (YANG & PLEWE 2016).

85 % der Unternehmen sehen die fehlende Begleitung bei der Einführung als Hemmnis bei der Einführung kognitiver Assistenzsysteme (WILLEKE & KASSELMANN 2016). Um Transparenz und Entscheidungsunterstützung zu ermöglichen sind unternehmensindividuelle Einführungsstrategien für Assistenzsysteme erforderlich (LANZA ET AL. 2018).

1.2 Zielsetzung

Um die aufgezeigten Potenziale kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage zu realisieren, besteht für produzierende Unternehmen branchenübergreifend ein Unterstützungsbedarf. Es wird eine Handlungsanleitung benötigt, mit welcher in einem gegebenen manuellen Montagesystem ein kognitives Assistenzsystem eingeführt werden kann. Ziel dieser Arbeit ist daher, eine Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage zu entwickeln.

Dabei sollen Einflussfaktoren identifiziert werden, mit denen eine bedarfsgerechte Identifikation der benötigten Assistenzfunktionen erfolgen kann. Um diese zu realisieren, soll ein Werkzeug zur methodischen Auswahl möglicher technologischer Lösungen entwickelt werden. Zudem soll ein Vorgehen entwickelt werden, wie Mitarbeiter in die Technologieauswahl eines kognitiven Assistenzsystems eingebunden werden können, um die notwendige Akzeptanz sicherzustellen. Zur Auswahl einer Lösungsalternative ist ein Vorgehen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit kognitiver Assistenzsysteme zu entwickeln.

Als gegebene Voraussetzung für die Anwendung der Methode soll ein Montagesystem angenommen werden, an welchem bereits Methoden der schlanken Produktion angewandt worden sind, um existierende Verschwendungen zu eliminieren. Dem Anwender der Methode sind die zukünftigen Herausforderungen des Unternehmens bekannt und eine repräsentative Auswahl der zukünftigen Nutzer des kognitiven Assistenzsystems stehen für eine Einbindung in den Einführungsprozess zur Verfügung.

Als Ergebnis der Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage soll eine für den Anwendungsfall individuelle Konzeptionierung der Assistenzfunktionen erfolgen. Zudem ist eine Auswahl von Hardware- und Softwarekomponenten zu treffen, die für die Nutzung des Assistenzsystems benötigt werden. Eine abschließende Wirtschaftlichkeitsbewertung stellt die erwarteten Kosten und Nutzen des Assistenzsystems dar.

1.3 Forschungsmethodisches Vorgehen

Nach ULRICH & HILL (1976) wird die Wissenschaft in Formal- und Realwissenschaften unterteilt. Formalwissenschaften beschäftigen sich mit der „*Konstruktion von Sprachen, d. h. von Zeichensystemen mit Regeln zur Verwendung dieser Zeichen*“ (ULRICH & HILL 1976, S. 305). Hierzu gehören beispielsweise Mathematik,

1 Einleitung

Logik und Philosophie. Im Gegensatz dazu beschäftigen sich die Realwissenschaften mit der „*Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch (sinnlich) wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte*“ (ULRICH & HILL 1976, S. 305). Die Ingenieurwissenschaften sind daher den Realwissenschaften zuzuordnen.

Die Realwissenschaften können wiederum in reine bzw. Grundlagenwissenschaften sowie angewandte bzw. Handlungswissenschaften unterteilt werden. Während die Naturwissenschaften den Grundlagenwissenschaften zugeordnet werden, gehören bspw. die Sozialwissenschaften zu den Handlungswissenschaften. Die Ingenieurwissenschaften lassen sich nicht eindeutig einer der beiden Kategorien zuordnen, sondern stehen im Spannungsfeld zwischen Grundlagen- und Handlungswissenschaften (GRUNWALD 2006). SIEMONEIT (2010) charakterisiert die Ingenieurwissenschaften als Realtechnikwissenschaften.

In den angewandten Wissenschaften steht die „*Analyse menschlicher Handlungsalternativen zwecks Gestaltung sozialer und technischer Systeme im Vordergrund*“ (ULRICH & HILL 1976, S. 305). Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Handlungsalternativen bei der Gestaltung kognitiver Assistenzsysteme, die sowohl als soziale als auch als technische Systeme eingeordnet werden können. Während früher Arbeitsanweisungen ausschließlich mündlich oder papierbasiert bereitgestellt worden sind, ermöglichen die zahlreichen Entwicklungen der Elektronikindustrie heute zahlreiche neue Gestaltungsmöglichkeiten für die industrielle Montage. So kann diese Arbeit eindeutig den angewandten Wissenschaften bzw. Handlungswissenschaften zugeordnet werden.

Um das in Abschnitt 1.2 formulierte Ziel zu erreichen, ist ein schrittweises methodisches Vorgehen erforderlich. Nach POPPER (1935) besteht „*die Tätigkeit des wissenschaftlichen Forschers (...) darin, Sätze und Systeme von Sätzen aufzustellen und systematisch zu überprüfen*“ (POPPER 1935, S. 1). Um dieses Vorgehen umzusetzen, sollen Forschungsfragen aus der Zielsetzung abgeleitet werden. Zu deren Beantwortung werden kreativ-synthetisch Modelle zur Beschreibung kognitiver Assistenzsysteme und derer Funktionen in der manuellen Montage konzipiert. Hiermit wird ein Ordnungsrahmen geschaffen, der ein systematisches Vorgehen bei der Einführung von Assistenzsystemen ermöglicht. Auf Basis dieser Modelle wird eine Handlungsanleitung, die Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme, entwickelt und im Anschluss überprüft. Die aufgestellten Forschungsfragen lauten:

- *Forschungsfrage 1:* Wie können, ausgehend von den zu erzielenden Verbesserungen, Assistenzfunktionen für die manuelle Montage identifiziert werden?
- *Forschungsfrage 2:* Mit welchen technologischen Lösungen können benötigte Assistenzfunktionen realisiert werden?
- *Forschungsfrage 3:* Wie können Mitarbeiter in die Technologieauswahl eines kognitiven Assistenzsystems eingebunden werden?
- *Forschungsfrage 4:* Wie können qualitative Einflüsse in der Wirtschaftlichkeitsbewertung eines kognitiven Assistenzsystems in der manuellen Montage berücksichtigt werden?

Nach der Entwicklung der Methode soll im Anschluss, entsprechend dem Vorgehen von POPPER (1935), eine deduktive Überprüfung erfolgen. Diese wird durch eine empirische Anwendung abgeschlossen, die feststellen soll, „*ob sich das Neue, das die Theorie behauptet, auch praktisch bewährt, etwa in wissenschaftlichen Experimenten oder in der technisch-praktischen Anwendung*“ (POPPER 1935, S. 6). In dieser Arbeit wird für diese empirische Anwendung ein Anwendungsfall in der Montage ausgewählt, an dem eine Einführung kognitiver Assistenzsysteme auf Basis der entwickelten Methode unterstützt wird. Die Anwendung der Methode erfolgt an manuellen Montagearbeitsplätzen in einem Unternehmen, das kundenspezifische Antriebslösungen in Kleinserien entwickelt und produziert. Ausgehend von einem manuellen Montagesystem ohne Einsatz kognitiver Assistenzsystemen, wird schrittweise die Einführung eines kognitiven Assistenzsystems auf Basis der entwickelten Modelle durchgeführt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich in neun inhaltliche Kapitel (Abbildung 1). In der Einleitung in *Kapitel 1* werden Ausgangssituation, Zielsetzung, das forschungsmethodische Vorgehen und der Aufbau der Arbeit erläutert. *Kapitel 2* stellt die zum Verständnis der Arbeit benötigten Grundlagenthemen dar. Diese umfassen kognitive Assistenzsysteme, manuelle Montage sowie die für das Forschungsthema relevanten Aspekte aus der Arbeitswissenschaft. Im Stand der Technik in *Kapitel 3* werden Methoden zur Komplexitätsbewertung in der manuellen Montage vorgestellt. Es werden Klassifizierungen kognitiver Assistenzsysteme beschrieben sowie Ansätze zur Erhöhung der Akzeptanz von Assistenzsystemen erläutert. Vorhandene Methoden zur Auswahl kognitiver Assistenzsysteme werden vorgestellt und daraus der Handlungsbedarf abgeleitet.

1 Einleitung

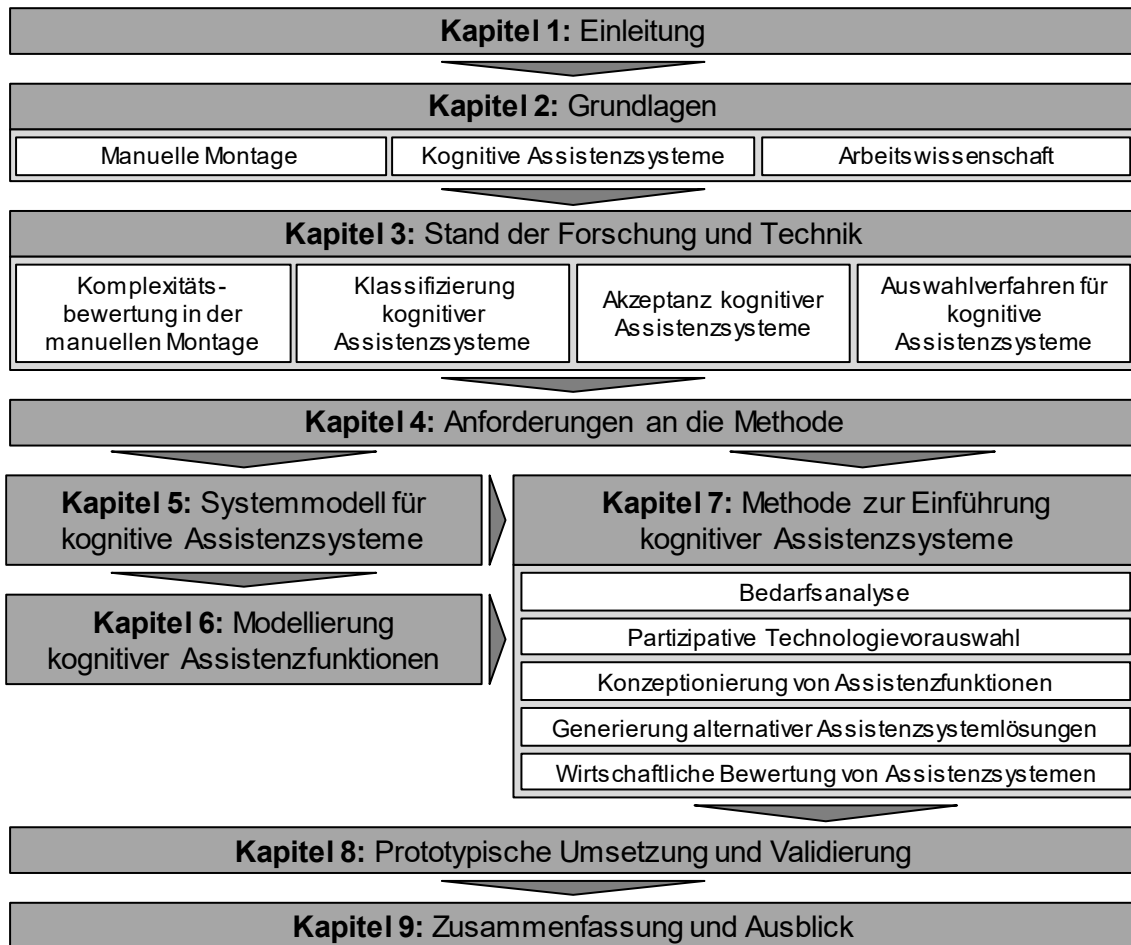


Abbildung 1: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Kapitel 4 stellt die Anforderungen dar, die durch die zu entwickelnde Methode erfüllt werden sollen. In *Kapitel 5* wird ein Systemmodell für kognitive Assistenzsysteme dargestellt. Mit Hilfe dieses Modells können die Elemente kognitiver Assistenzsysteme beschrieben werden. *Kapitel 6* beschreibt die entwickelte Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen mit der eine technologiefreie Beschreibung von Funktionalitäten des Assistenzsystems ermöglicht wird. In *Kapitel 7* werden in der Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme das Systemmodell sowie die Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen genutzt. Für jeden der fünf Schritte der Methode ist zudem ein eigenes Unterkapitel vorgesehen. *Kapitel 8* zeigt die prototypische Umsetzung der Einführungsmethode und die Validierung der Methode an einem Anwendungsfall in der variantenreichen Montage von Planetengetrieben. Anschließend folgt die technisch-wirtschaftliche Bewertung. Eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf weitere Forschungsthemen werden in *Kapitel 9* dargestellt.

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Im folgenden Kapitel werden die notwendigen Grundlagen für diese Arbeit beschrieben. Es erfolgt eine Begriffsklärung der manuellen Montage sowie eine Darstellung der Gestaltungsoptionen von Montagesystemen und Grundsätze zur Gestaltung zukünftiger Montageeinrichtungen. Danach wird auf den Begriff der kognitiven Assistenzsysteme eingegangen. Im Anschluss werden relevante Modelle der Arbeitswissenschaft mit Fokus auf die Gestaltung von Arbeitssystemen und der menschenzentrierten Entwicklung interaktiver Systeme gezeigt.

2.2 Manuelle Montage

2.2.1 Begriffsklärung

WIENDAHL (2010) modelliert Produktionsunternehmen als Systeme mit Input- und Outputfunktionen. Als Inputgrößen werden Menschen, Anlagen/Maschinen, Material, Energie und Information betrachtet. Die Produktion transformiert diese zu Erzeugnissen, Abfällen sowie Informationen für den Absatzmarkt. Als Subsysteme erster Ordnung von Produktionsunternehmen werden Beschaffung, Produktion und Distribution verstanden (Abbildung 2).

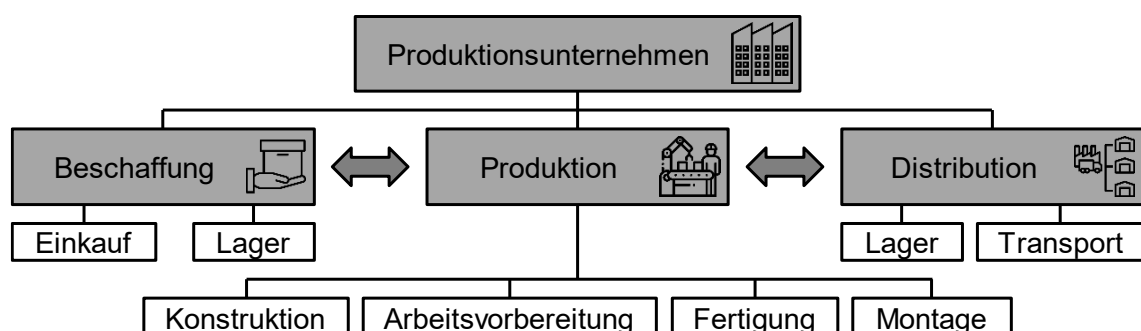


Abbildung 2: Subsysteme von Produktionsunternehmen erster und zweiter Ordnung (in Anlehnung an WIENDAHL (2010))

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert die *Montage* als „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen“ (VDI 2815, S. 3). Nach WARNECKE (1996) wird unter Montage „der

2 Grundlagen

*Zusammenbau von Einzelteilen, Baugruppen und formlosen Baugruppen zu höherwertigen Baugruppen oder Endprodukten verstanden.“ (WARNECKE 1996, S. 3). Im Standardwerk *Dubbel* umfasst das Montieren die „Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Dabei kann zusätzlich formloser Stoff zur Anwendung kommen.“ (SELIGER 2007, S. S88).*

Die Montage kann in fünf Teilfunktionen untergliedert werden (Abbildung 3). Der in den Definitionen genannte *Zusammenbau* wird durch einen Fügeprozess realisiert, welcher die Hauptfunktion der Montage bildet. Diese wird durch weitere Prozessschritte des Handhabens, des Kontrollierens, des Justierens oder durch Sonderoperationen ergänzt (SELIGER 2007, LOTTER 2012A).

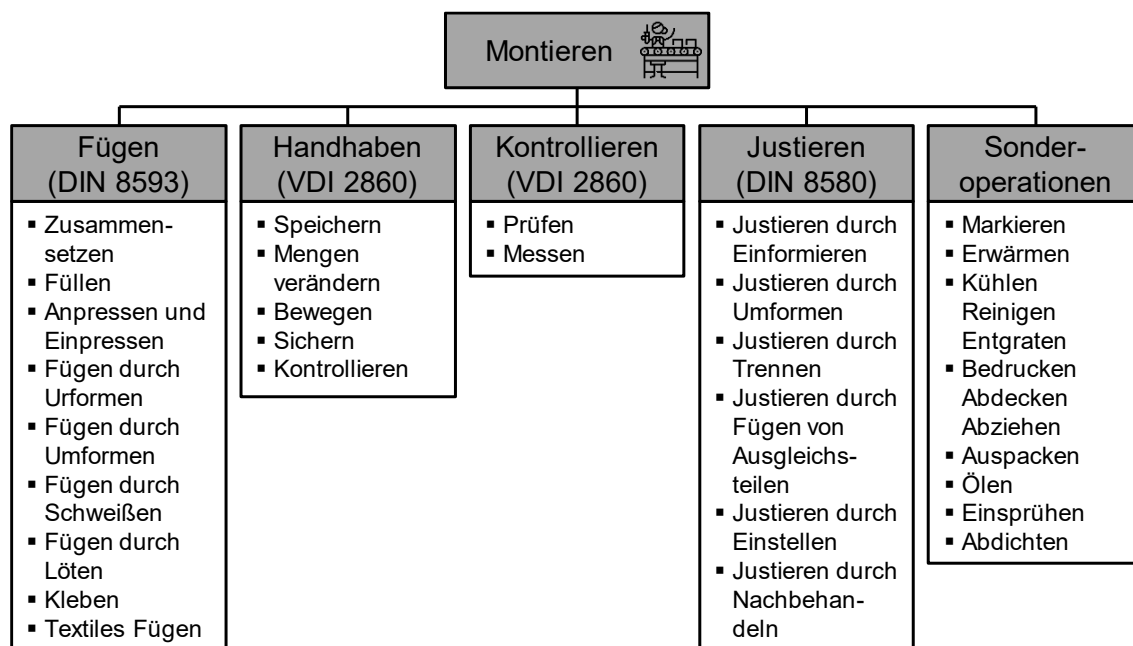


Abbildung 3: Funktionen der Montage (in Anlehnung an LOTTER 2012A)

Diese fünf Funktionen könne nach SPUR & HELLWIG (1986) in Primär- und Sekundärmontage eingeteilt werden. Während das Fügen die Primärmontage bildet, sind die restlichen vier Funktionen der Sekundärmontage zuzuordnen. Mithilfe der Primär-Sekundär-Analyse nach LOTTER (2012B) können innerhalb der Montageplanung die Wirtschaftlichkeit beurteilt sowie Optimierungspotenziale identifiziert werden.

LOTTER (2012A) unterscheidet zwischen automatischer Montage, halbautomatischer Montage (Hybridsysteme) und manueller Montage. Mit dem Automatisierungsgrad steigen Investment und die notwendige Losgröße an. Die Flexibilität sinkt dagegen mit dem Automatisierungsgrad und ist in der manuellen Montage

am höchsten. Die manuelle Montage ist jedoch für große Stückzahlen nicht wirtschaftlich (LOTTER 2012A). Zudem bestimmen die Fähigkeiten des Menschen die Möglichkeiten und Grenzen der manuellen Montage (MILBERG & REINHART 1996). Der Automatisierungsgrad in der Montage kann aber, je nach Teilaufgabe der Montage, variabel gestaltet werden. Beispielsweise können Fügeprozesse durch einen Schraubautomaten automatisiert werden, während Transportaufgaben manuell durchgeführt werden (STEINBAUER 2012).

Die Funktionen der Montage werden durch die Komponenten des Montagesystems erfüllt. Nach SPUR & HELLWIG (1986) können Montagesysteme in materielle, dispositive und operative Komponenten aufgeteilt werden (Abbildung 4). In diese drei Komponenten fallen die sechs Systemelemente Montageobjekt, Montagemittel, Montageplanung, Montagesteuerung, Montagepersonal und Montageprozess. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich u.a. mit einer Digitalisierung der Montageplanung durch den Einsatz von Simulationen (MICHNIEWICZ 2019).

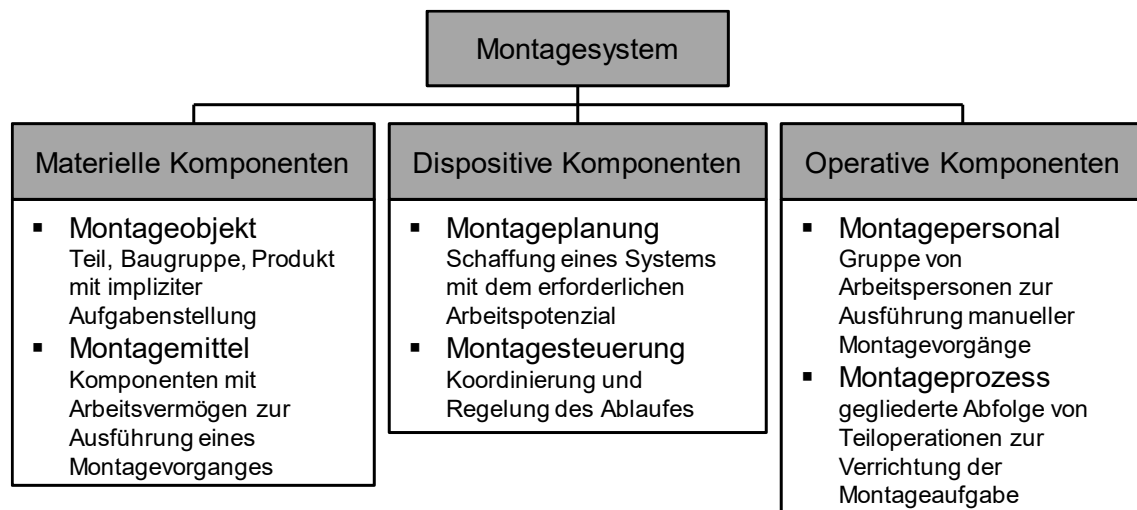


Abbildung 4: Elemente eines Montagesystems
(in Anlehnung an SPUR & HELLWIG 1986)

2.2.2 Gestaltung variantenreicher Montagesysteme

Aufgrund ihrer Position als letztes Glied in der betrieblichen Wertschöpfungskette (PFEIFFER 2007) kann die Montage als „Sammelbecken organisatorischer, terminlicher und qualitativer Fehler“ (REINHART & SCHNEIDER 1996, S. 1239) bezeichnet werden. Aufgrund der steigenden Variantenvielfalt ergeben sich zahlreiche Herausforderungen für die Montage. In diesem Abschnitt soll dargestellt werden, mit welchen Maßnahmen die materiellen, dispositiven sowie operativen Komponenten eines Montagesystems beeinflusst werden können. Der Fokus liegt dabei

2 Grundlagen

auf der Beherrschung einer hohen Variantenvielfalt. Diese liegt beispielsweise in der Serienproduktion in der Automobilindustrie, der Hausgeräteindustrie oder bei der Produktion von Consumer-Elektronik vor (LIEDL 2014).

Materielle Komponenten

Ausgangspunkt der Gestaltung von *Montageobjekten* und *Montagemitteln* ist die Produktgestaltung. Nach EVERSHEIM (1996) ist hierbei auf eine montagegerechte Konstruktion, eine Standardisierung von Bauteilen sowie eine montagegerechte Strukturierung zu achten. Bei der montagegerechten Konstruktion sind wiederum Montagemittel, Hilfsmittel, Bauteilgestaltung, Fügeverfahren, Werkstoff sowie Fertigungsverfahren zu berücksichtigen. Durch die montagegerechte Konstruktion können Montagevorgänge vereinfacht und insbesondere deren Anzahl reduziert werden. Eine Standardisierung von Bauteilen reduziert nicht nur Aufwände in der Montage. Auch Einkauf, Materiallager, -verwaltung und -bereitstellung sowie die Fertigung werden entlastet. Eine geringere Anzahl an Bauteilen kann die Kapitalbindung und den Bedarf an Montagevorrichtungen senken. Eine Montagegerechte Produktstruktur zeigt sich durch Baugruppen, die vormontierbar, vorprüfbar, standardisiert, austauschbar und in ihrer Anzahl überschaubar sind (EVERSHEIM 1996). Gerade bei einem variantenreichen Produktportfolio ist die Modularisierung eine wichtige Maßnahme zur Reduzierung der Komplexität (MÜHLENBRUCH 2004).

Dispositive Komponenten

Das Variantenmanagement hat das Ziel, die Anzahl der Variantenteile gering zu halten. Jedoch ist „*eine ständige Vorratshaltung aller Variantenteile (...) aufgrund der Kapitalbindung, des Verschrottungsrisikos und des Lageraufwandes wirtschaftlich nicht vertretbar*“ (NYHUIS ET AL. 2012, S. 290). Daher kommt der Materialbereitstellung in der variantenreichen Montage eine hohe Bedeutung zu. Sie kann als Aufgabe der *Montageplanung und -steuerung* als dispositive Komponente des Montagesystems eingeordnet werden.

Diese hat nach REFA (1985, S. 172) die Aufgabe „*das im Betrieb verfügbare Material für die Verwendung bei der Aufgabendurchführung in der benötigten Art und Menge termingerecht am Bereitstellungsplatz zur Verfügung zu stellen.*“ Nach BULLINGER & LUNG (1994) kann zwischen verschiedenen Materialbereitstellungsstrategien unterschieden werden (Abbildung 5). Die Materialbereitstellung kann dabei nach Bedarf bzw. nach Verbrauch durchgeführt werden. Erfolgt eine stückzahlgenaue Bereitstellung, kann diese beispielsweise über eine Kommissionierung erfolgen. Diese kann über mehrere Aufträge, über einen einzelnen Auftrag, über

einen Teil des Auftrags sowie für ein einzelnes Produkt stattfinden. Werden Einzelteile bzw. Baugruppen bereitgestellt, kann dies im just in time (JIT)-Verfahren erfolgen. Wird Material dagegen gebindeorientiert und nach Bedarf bereitgestellt, ist dies mit einem periodischen Verfahren möglich. Wird eine Materialbereitstellung nach Verbrauch durchgeführt (z. B. C-Teile), kann hierfür das KANBAN-Prinzip genutzt werden, das selbststeuernde Regelkreise schafft und die Materialversorgung nach dem Pull-Prinzip steuert. Bei einem Mehr-Behälter-System löst ein leerer Behälter die Bereitstellung einer Nachlieferung aus. Ein Handlager wird dagegen periodisch oder durch Nachforderung durch das Personal aufgefüllt.

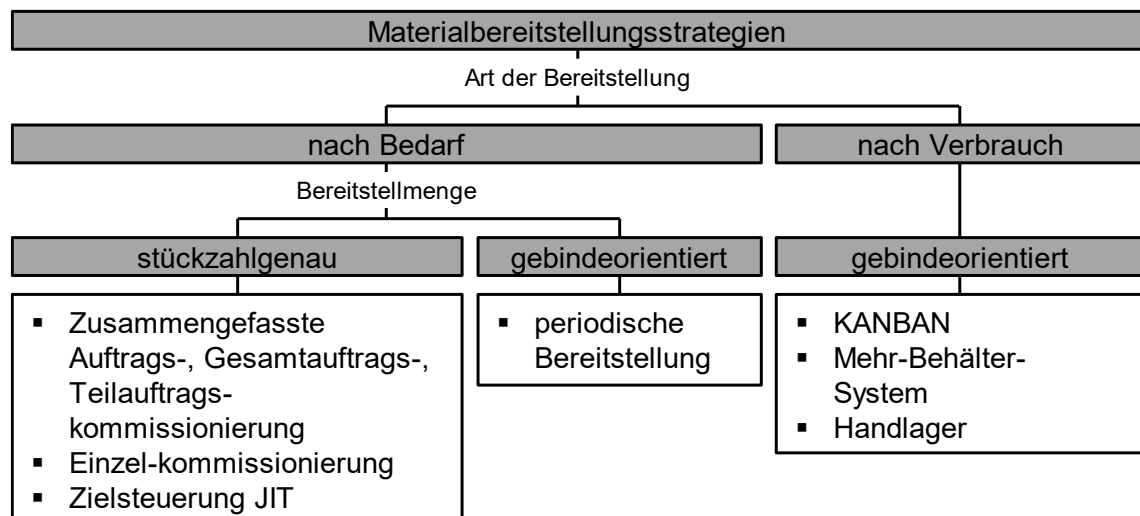


Abbildung 5: *Materialbereitstellungsstrategie*
(in Anlehnung an BULLINGER & LUNG 1994)

Operative Komponenten

In der variantenreichen Montage kommt es vor, dass das *Montagepersonal* aufgrund der Vielfalt der Arbeitsschritte und den sich dazwischen ergebenden zeitlichen Abständen in eine Phase des Verlernens bzw. Vergessens gerät (HOEDT ET AL. 2018). Hierfür sind Strategien gegen diesen Vergessenseffekt zu wählen:

- *Strategische Aufgabenzuordnung (engl.)*: Durch die Methode der job rotation werden Monteure regelmäßig oder bei Bedarf anderen Produkten bzw. Produktgruppen zugeordnet.
- *Nachschulung (engl. retraining)*: Bevor ein Wechsel zu einem Produkt bzw. einer Produktgruppe erfolgt, die über einen längeren Zeitraum nicht mehr montiert worden ist, wird eine Nachschulung durchgeführt. Hierbei sind Zeitpunkt und Zeitdauer zu gestalten. Dabei ist sowohl eine physische als auch eine virtuelle Nachschulung möglich.

2 Grundlagen

Als weitere operative Komponente ist der *Montageprozess* festzulegen. Hierfür gilt es eine Organisationsform für die Montage zu wählen. SPUR & HELLWIG (1986) entwickelten hierfür eine strukturierte Unterteilung (Abbildung 6).

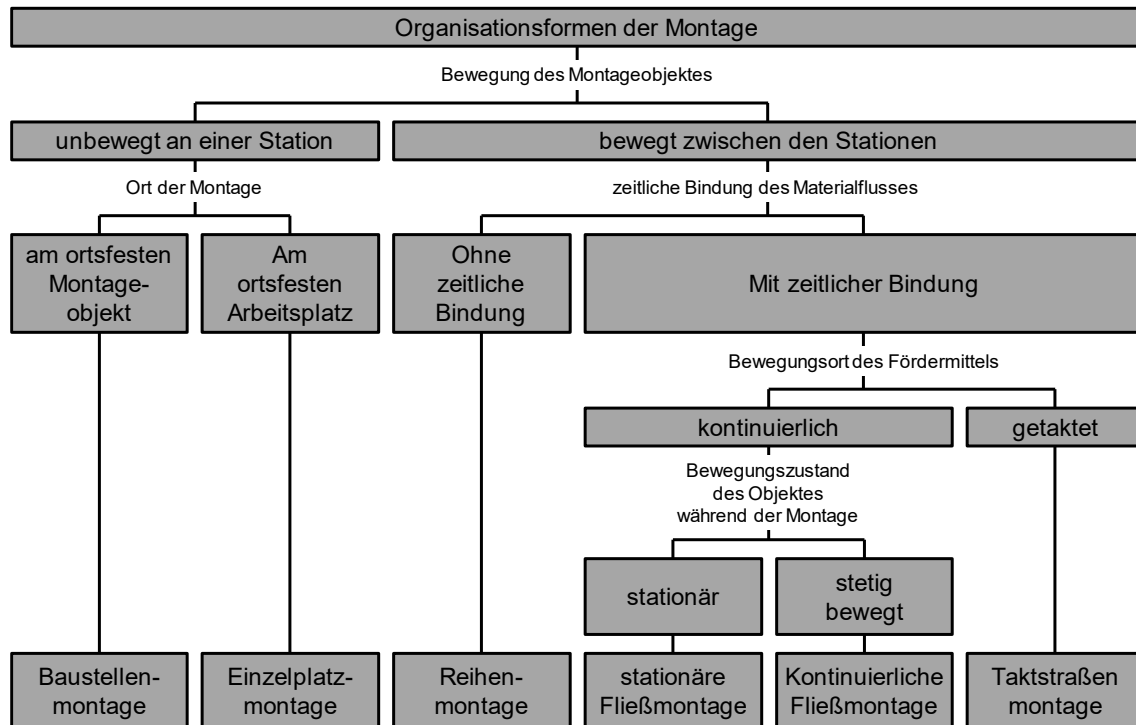


Abbildung 6: Organisationsformen der Montage (SPUR & HELLWIG 1986)

Die Baustellenmontage bezeichnet dabei eine Montage an einem unbewegten, ortsfesten Montageobjekt. Diese ist oft im Maschinen- und Anlagenbau anzutreffen. Bei einem ortsfesten Arbeitsplatz wird von einer Einzelplatzmontage gesprochen. Eine gesamte Einheit wird hier durch eine Person an einem Arbeitsplatz montiert, der alle benötigten Einzelteile und Werkzeuge bereitstellt. Bei einer Bewegung des Montageobjektes zwischen Stationen findet eine Arbeitsteilung statt. Wird hierbei keine Taktzeit vorgegeben und der Materialfluss nicht zeitlich festgelegt, so wird dies als Reihenmontage bezeichnet. Ist der Materialfluss zeitlich gebunden, ist zusätzlich bezüglich der Bewegung des Fördermittels zu differenzieren. Ist diese kontinuierlich und wird das Montageobjekt für die Montage vom Fördermittel getrennt, wird dies als stationäre Fließmontage definiert. Bewegt sich das Montagepersonal während der Montage mit, so wird von einer kontinuierlichen Fließmontage gesprochen. Diese findet sich häufig in der Automobilendmontage. Bei einer getakteten Bewegung des Fördermittels erfolgt ein Weitertransport in starren Schritten, was als Taktstraßenmontage bezeichnet wird. Weiterhin ist in der manuellen Montage ein Montageablaufprinzip zu wählen. Hierbei ist sowohl eine stückweise als auch eine satzweise Montage möglich (LOTTER 2012C). Bei

der stückweisen Montage werden alle durchzuführenden Schritte an einem Produkt vollständig durchgeführt. Im Anschluss daran wird das nächste Produkt montiert. In der satzweisen Montage wird innerhalb eines zu montierenden Satzes jeweils der erste Montagevorgang an allen zu montierenden Produkten durchgeführt und im Anschluss weitere Schritte jeweils für alle Produkte durchgeführt, bis der zu montierende Satz abgeschlossen ist.

2.2.3 Grundsätze zukünftiger Montageeinrichtungen

Die Anforderungen an die Montage, die sich durch die Steigerung der Variantenvielfalt ergeben, sind vielfältig. LOTTER (2012A) stellt zusammenfassend sechs Grundsätze für die Gestaltung zukünftiger Montageeinrichtungen auf:

1. Erhöhung der Flexibilität in der Montage
2. Erhöhung des Anteils wiederverwendbarer Komponenten einer Montageanlage
3. Variantenbildung zum spätestmöglichen Zeitpunkt
4. Schnelle Erreichung der Planstückzahl
5. Reduzierung von Montagekosten
6. Beherrschung von Teilbereitstellung und -zuführung

Durch kognitive Assistenzsysteme können mehrere dieser Grundsätze unterstützt werden. Eine Flexibilitätserhöhung kann erzielt werden, indem auftragspezifische Prozessbeschreibungen genutzt werden, die Mitarbeiter dazu befähigen ein breiteres Produktspektrum zu montieren. Durch ein Assistenzsystem erhöhen sich zwar die Komponenten einer Montageanlage, diese sind jedoch im Regelfall wiederverwendbar (z. B. Kamera). Lediglich einzelne Softwaremodule sind produktspezifische Komponenten kognitiver Assistenzsysteme. Eine Variantenbildung zum spätestmöglichen Zeitpunkt kann jedoch als Aufgabe der Produktentwicklung sowie Montageplanung gesehen werden. Die schnellere Erreichung der Planstückzahl, kann durch eine schnellere Qualifizierung der Mitarbeiter mittels Assistenzsysteme erfolgen. Die Reduzierung von Montagekosten kann durch eine frühzeitige Fehlerkennung durch das Assistenzsystem sowie der Verringerung von Informationsbeschaffungszeiten erzielt werden. Die Teilezuführung kann mittels kognitiver Assistenzsysteme beispielsweise durch ein Pick-by-Light-System unterstützt werden.

2.3 Kognitive Assistenzsysteme

2.3.1 Begriffsklärung

Der Begriff „Assistenz“ ist auf das lateinische Wort „assistere“ zurückzuführen. Dieses lässt sich nach dem etymologischen Wörterbuch der deutschen Sprache in das deutsche Wort „beistehen“ übersetzen KLUGE (1989). BEETZ (2006, S. 24) definiert „Assistenz“ folgendermaßen: *„Assistenz ist die Unterstützung einer Person bei der Erfüllung einer Aufgabe durch geeignete Mittel.“* Diese Definition greift auf, dass eine Assistenz nicht unbedingt vollumfänglich, sondern bei einer oder mehreren konkreten Aufgaben durch konkrete Mittel unterstützend wird. Unter einer Assistenz ist daher eine unterstützende, keine ersetzende Funktion zu verstehen.

Die Mittel der Assistenz konkretisiert BEETZ (2006, S. 25) in seiner Definition eines Assistenzsystems: *„Ein Assistenzsystem ist eine Anordnung von Komponenten mit dem ausdrücklichen Ziel, Unterstützung bei einer bestimmten Aufgabe zu gewähren, gesteuert von einer informationstechnischen Einheit, die ausreichend komplex gestaltet ist, um eine Verarbeitung der Informationen oder eine entsprechende Anpassung des Systemverhaltens zu ermöglichen.“* In dieser Definition wird ersichtlich, dass ein Assistenzsystem aus Komponenten besteht, welche von einem IT-System gesteuert werden. Ein Handbuch aus papierbasierten Anleitungen würde beispielsweise die Funktion der Assistenz erfüllen. Aufgrund der fehlenden Steuerung durch ein IT-System ist es jedoch nicht als Assistenzsystem zu betrachten.

Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (acatech) definiert Assistenzsysteme folgendermaßen: *„Solche sowohl aus Software als auch aus Hardware bestehenden Systeme unterstützen den Menschen bei der Bewältigung seiner Aufgaben, indem sie ihm assistieren. Diese Hilfe kann beispielsweise in der Vorbereitung der Entscheidungsfindung bei Planungsproblemen (wie im Fall logistischer Assistenzsysteme) bestehen oder bei der ereignisbasierten Unterstützung der operativen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mithilfe mobiler smarter Endgeräte erfolgen.“* (ACATECH 2016, S. 45). Diese Definition stellt zwei Unterstützungsformen dar, wobei zwischen Entscheidungsunterstützung und ereignisbasierter Unterstützung unterschieden wird. Innerhalb der Assistenzsysteme nehmen BENGLER ET AL. (2017, S. 57) eine Unterteilung in zwei Unterkategorien vor: *„Unter (Mitarbeiter-) Assistenzsystemen können jegliche Systeme verstanden werden, die den*

Mitarbeiter bei seinen Handlungen unterstützen. Dabei können sie die Informations-, Entscheidungs- und Ausführungsebene adressieren, wobei Wahrnehmungs- und Entscheidungsassistenzsysteme als kognitive Unterstützung und Ausführungsassistenzsysteme als physische Unterstützung verstanden werden können.“. Eine Unterscheidung zwischen kognitiver und physischer Unterstützung findet sich auch bei MERKEL ET AL. (2016). Anstelle des Begriffs der kognitiven Assistenzsysteme werden in der Literatur jedoch noch weitere Begriffe genutzt, mit denen Assistenzsysteme beschrieben werden, die Mitarbeiter mittels Informationen unterstützen. Dies umfasst zum einen den Begriff der „*digitalen Assistenzsysteme*“ (REINHART ET AL. 2009, HOLD ET AL. 2016A, APT ET AL. 2018B). Des Weiteren sprechen JESKE & LENNINGS (2016) sowie BORNEWASSER ET AL. (2018) von „*informativischen Assistenzsystemen*“. RICHTER ET AL. (2015) unterscheiden zwischen informativischen und kognitiven Assistenzsystemen, womit sie eine Abstufung der Intelligenz des Assistenzsystems einführen. Für den Begriff „*kognitive Systeme*“ existiert in der Literatur auch ein engeres Verständnis des Begriffs, welcher eine höhere Form an Intelligenz des Systems voraussetzt. ZÄH ET AL. (2007) beschreiben kognitive technische Systeme als technische Systeme, die Schlüsse ziehen können, aus Erfahrungen lernen, Erklärungen geben und annehmen können, sich der eigenen Fähigkeiten bewusst sind und robust auf unvorhergesehene Situationen reagieren können.

Auf Basis der dargestellten Definitionen soll im Rahmen dieser Arbeit von kognitiven Assistenzsystemen gesprochen werden sofern folgende drei Kriterien erfüllt sind:

- Es findet eine Unterstützung des Mitarbeiters mit einem definierten Ziel und kein Ersatz des Mitarbeiters durch eine Vollautomatisierung statt.
- Die Art der Unterstützung erfolgt durch Aufnahme, Verarbeitung bzw. Ausgabe von Informationen. Eine ggf. zusätzlich vorliegende physische Unterstützung wird nicht als Teil des kognitiven Assistenzsystems erachtet.
- Die Elemente des Assistenzsystems setzen sich aus Hardware- und Softwarekomponenten zusammen.

Aus diesen Kriterien abgeleitet wurde im Rahmen dieser Arbeit folgende Definition für kognitive Assistenzsysteme im Produktionsumfeld erarbeitet:

Kognitive Assistenzsysteme sind IT-Systeme, bestehend aus Hardware- und Softwarekomponenten, die Produktionsmitarbeiter durch die Aufnahme, Verarbeitung und Ausgabe von Informationen bei einem oder mehreren Zielen einer definierten Arbeitsaufgabe unterstützen.

2.3.2 Etablierte Technologien

Im Zuge der Digitalisierung von Produktionssystemen sind kognitive Assistenzsysteme bereits in vielen Unternehmen im Einsatz. Die Betrachtung dieser Assistenzsysteme zeigt, dass hauptsächlich Systeme genutzt werden, die dem Werker Informationen bereitstellen. Bezogen auf die Definition kognitiver Assistenzsysteme stehen bei bereits etablierten Systemen die Ausgabe von Informationen im Fokus, während die Aufnahme und Verarbeitung von Daten weniger ausgeprägt sind. Hierbei existieren bereits zahlreiche Ansätze in der Industrie (Abbildung 7).




Digitale Anleitungen 	Pick-by-Light 	Projektionen 
<ul style="list-style-type: none">▪ Schritt-für-Schritt Beschreibung der Arbeitsschritte▪ Einbindung von Texten, Fotos, Videos sowie CAD-Objekten	<ul style="list-style-type: none">▪ Visualisierung benötigter Materialien an Montage- und Verpackungsarbeitsplätzen▪ Eingriffskontrolle integrierbar	<ul style="list-style-type: none">▪ Projektion von Arbeitsanweisungen in den Arbeitsbereich▪ Kombination von Pick-by-Light und Schritt-für-Schritt Anleitungen

Abbildung 7: Etablierte Technologien kognitiver Assistenzsysteme

Hierzu zählen Softwaresysteme für digitale Anleitungen, die Mitarbeitern eine Prozessbeschreibung digital bereitstellen. Diese Systeme sind häufig erste Ansätze, eine früher papiergebundene Anleitung in ein digitales System zu überführen. Pick-by-Light-Systeme unterstützen bei Greiftätigkeiten in variantenreichen Montageszenarien durch Signalleuchten an den jeweiligen Entnahmefächern und sind auch in der Intralogistik verbreitet. Projektionen können genutzt werden, um Informationen direkt am Arbeitsplatz oder Bauteil bereitzustellen.

Im Bereich der digitalen Anleitungen entwickelten DOMBROSKWI ET AL. (2010) eine Montageunterstützung für ein Fahrzeugwerk. Dafür wurden Montagetätigkeiten fotografiert und um eine Beschreibung der einzelnen Prozessschritte erweitert. Diese Tätigkeitsbeschreibung wurde zentral im ERP-System abgelegt und dem Werker bei der Durchführung des Produktionsauftrags angezeigt. Gegenüber papierbasierten Konzepten konnten neue Arbeitsanweisungen durch eine zentrale Bereitstellung schneller verbreitet werden. FISCHER ET AL. (2014) entwickelten ein Werkerinformationssystem, das als browserbasierte Webapplikation funktioniert und daher nicht lokal am Arbeitsplatz installiert werden muss. Es bindet 3D-CAD-Daten ein und erweitert diese um Prozessbeschreibungen. Durch die Anbindung

von CAD-Daten können generierte 3D-Grafiken anstelle von Fotos eingesetzt werden. Dadurch sinken die Aufwände bei der Erstellung und Pflege der digitalen Arbeitsanweisungen. KRÖGER & VIERFUß (2016) entwickelten ein Werkerinformationssystem, welches drei separate Qualifikationsstufen (Anfänger, Medium, Experte) ermöglicht. Die jeweiligen Nutzer haben Zugriff auf die Liste der gebauten Geräte und deren Prüfprotokolle. So soll ein Feedback zwischen Qualitätsprüfung und Montage erzielt werden. TEUBNER et al. (2017) differenzieren zwischen dynamischen und individuellen Funktionalitäten von Werkerinformationssystemen, um sowohl auftragsspezifische als auch mitarbeiterspezifische Informationen zu modellieren.

Eine Befragung unter 40 produzierenden Unternehmen zeigt, dass in der Montageassistenz die Gestaltungselemente Text, Tabellen und Zeichnungen weit verbreitet sind, deren Verwendung jedoch reduziert werden soll (WIESBECK 2014). Animationen und Videos werden dagegen kaum eingesetzt, sollen jedoch in Zukunft vermehrt genutzt werden.

Um Greifvorgänge in der variantenreichen Montage zu unterstützen, können Pick-by-Light-Systeme eingesetzt werden. In einer optimierten Reihenfolge wird jeweils das als nächstes zu greifende Material durch ein aufleuchtendes Signal am entsprechenden Fach angezeigt (NYHUIS ET AL. 2012). Um den tatsächlichen Griff in das jeweilige Fach zu kontrollieren, können Pick-by-Light-Systeme um eine Eingriffskontrolle erweitert werden. KERBER & LESSEL (2015) zeigen ein kognitives Assistenzsystem, in dem mithilfe einer Tiefenbild-Analyse überwacht wird, ob in den jeweiligen Behälter gegriffen wird.

Um Fehler während der Fügeprozesse in der manuellen Montage zu vermeiden, können Informationen direkt in den Arbeitsbereich der Monteure eingebracht werden (BÄCHLER ET AL. 2014). HINRICHSSEN ET AL. (2017) zeigen hierbei eine projektionsbasierte Lösung. Oberhalb des Arbeitsplatzes wird ein Projektor angebracht, welcher CAD-Objekte, Beschreibungen, Fotos sowie Videos auf die Arbeitsfläche projizieren kann. Beim Einsatz von Montagevorrichtungen mit definierter Position können die jeweiligen Montageschritte an der jeweiligen Position des Werkstücks animiert werden. BANNAT (2014) stellt ebenfalls ein projektionsbasiertes Visualisierungskonzept vor. Hierbei wird eine Kamera integriert, die auch nicht ortsfeste Bauteile auf dem Arbeitstisch erkennen kann. In einem kontaktanalogen Pick-by-Light-System können damit auch Bauteile mittels Projektion hervorgehoben werden, die nicht in definierten Behältern, sondern in undefinierter Position auf der Arbeitsfläche liegen.

2.3.3 Zukünftige Technologien

Im Zuge sinkender Kosten für Elektronik (BOGNER ET AL. 2017) und wachsenden Möglichkeiten bei der Datenauswertung ermöglichen zahlreiche neue Technologien einen Mehrwert für kognitive Assistenzsysteme. Als relevante zukünftige Technologien sind die Schaffung einer Montageüberwachung, tragbare Endgeräte sowie Augmented Reality (AR) zu betrachten (Abbildung 8).

Während reine Werkerinformationssysteme das Defizit besitzen, dass trotz korrekter Prozessbeschreibung Fehler nicht umfassend verhindert werden können, soll durch neue Technologien eine Montageüberwachung realisiert werden. Diese Montageüberwachung greift dann ein, wenn durch den Monteur ein Fehler gemacht wurde. Zudem werden Assistenzsysteme mit tragbaren Endgeräten (engl. wearables) entwickelt, welche bereits im Alltag Verwendung finden. Als neue Technologie bietet AR die Vorteile, dass Informationen genau an der relevanten Position angezeigt werden.




Montageüberwachung 	Tragbare Endgeräte 	Augmented Reality 
<ul style="list-style-type: none">▪ Vermeidung von Überforderung und Erkennung von Montagefehlern▪ Hoher Integrationsaufwand für den Montageprozess	<ul style="list-style-type: none">▪ Abhaken von Checklisten mittels Headset▪ Auswertung von Gestensteuerungsinformationen zur Fortschrittskontrolle	<ul style="list-style-type: none">▪ Informationsdarstellung im Sichtfeld▪ Erfordert neue Technologien zur Generierung von Montageanleitungen

Abbildung 8: Zukünftige Technologien kognitiver Assistenzsysteme

Um adaptiv Informationen einzublenden, verwenden ZÄH ET AL. (2007) mehrere Tracking-Systeme. Diese umfassen u.a. eine Blickverfolgung mit Hilfe von Infrarotlicht basierter Augenauswertung sowie eine Handgestenerkennung über Infrarot Marker. Kamerasysteme werden für Gesichts-, Mimik- und Gestenerkennung genutzt. Die daraus entstandenen Daten sollen genutzt werden, um die Arbeitsumgebung als auch den Arbeitsablauf anzupassen. Ziel ist es eine Überforderung der Monteure zu vermeiden. Auch MÜLLER ET AL. (2014) nutzen Kamerasysteme mit Bildauswertung in der Montage. Hierbei wird die korrekte Benetzung der Kontaktzone mit Klebstoff durch das Assistenzsystem überwacht. Die Auswertung des Wärmebildes erfolgt durch den Mitarbeiter. Größere Fehler werden bereits automatisch durch das System erkannt. Nur wenn keine Schäden erkannt worden sind, kann das Bauteil freigegeben werden.

Die fortschreitende Nutzung von Smartphones und Tablets im Alltag zeigt eine starke Verbreitung von tragbaren Endgeräten im privaten Umfeld. Für industrielle Anwendungsfälle bestehen jedoch auch zahlreiche Einsatzfelder. Datenbrillen bieten im Gegensatz zu Tablets den Vorteil, dass Informationen an jedem Ort im Sichtfeld und ohne Nutzung der Hände bereitgestellt werden können (LINDNER ET AL. 2017). Um Informationen im Sichtfeld bereitzustellen und Checklisten berührungslos abzuholen, erprobten STOCKER ET AL. (2017) den Einsatz von Datenbrillen in der Fahrzeugmontage. Anstelle von Papierdokumenten erfolgte eine Einblendung von benötigten Checklisten direkt im Sichtfeld des Monteurs. Die dafür notwendige Rückmeldung wurde mittels Tasten-, Gesten- und Sprachsteuerung ermöglicht. Die Ergebnisse der empirischen Untersuchung demonstrieren jedoch, dass die Eingewöhnungszeit der Studienteilnehmer bei der Sprachsteuerung im Vergleich zur Tasten- und Gestensteuerung ca. doppelt so lang war. Zusätzlich wurden negative Kommentare der Versuchspersonen zum Tragekomfort der Datenbrille geäußert. BAUER ET AL. (2016) setzten ebenfalls Wearables in der Montage ein und verzichteten dabei auf eine Schritt-für-Schritt Anleitung. Der Einsatz von Wearables diene hier ausschließlich der Datenerfassung. Zudem wird eine systematische Einteilung von Wearables vorgestellt, die dieses in an Kopf, Hand, Oberkörper sowie an Füßen getragenen Komponenten einteilt. Erste Versuche zeigten, dass mittels Gyroskopdaten Muster zu Bewegungsabläufen erkannt werden können. Hierbei besteht das Potenzial, diese Daten für eine Fortschrittskontrolle in der Montage nutzen zu können.

NEB & STRIEG (2018) zeigen ein Vorgehen, um Augmented Reality-basierte Montageanleitungen zu erstellen und diese auf eine Datenbrille zu übertragen. Die Erstellung von Arbeitsanweisungen steht im Fokus, da diese einen hohen zeitlichen Aufwand erfordert. Hierbei wird zuerst mittels eines PCs eine Beschreibung der Prozessschritte angelegt. Diese werden mittels der Datenbrille um Positionsinformationen erweitert. Eine Ausgabe der erstellten Animation erfolgt ebenfalls per Datenbrille. Im Rahmen von Interviews untersuchten DANIELSSON ET AL. (2018) die Akzeptanz von Augmented Reality in der Montage von Verbrennungsmotoren. 21 von 28 Befragten standen der neuen Technologie positiv, sechs neutral und einer negativ gegenüber. Neben der Montage bietet auch die Instandhaltung einen Anwendungsbereich für Augmented Reality-Unterstützung (SCHLAGOWSKI ET AL. 2017).

2.4 Arbeitswissenschaft

2.4.1 Begriffsklärung

Die Arbeitswissenschaft ist nach DIN EN ISO 6385 die „*wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst, und der Berufsbranche, der Theorie, Prinzipien, Daten und Methoden auf die Gestaltung von Arbeitssystemen anwendet mit dem Ziel, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren.*“ (DIN EN ISO 6385, S. 5). Die Norm versteht unter einem Arbeitssystem ein „*System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen*“ (DIN EN ISO 6385, S. 6). Die Betrachtungen zu arbeitswissenschaftlichen Aspekten sind zentral für die Akzeptanz von Assistenzsystemen (APT ET AL. 2018B).

Im Kontext dieser Arbeit sind Monteur und kognitives Assistenzsystem als Elemente des Arbeitssystems *Montage* zu betrachten. Das einzuführende Assistenzsystem soll als zusätzliches Arbeitsmittel die Leistung des Montagesystems steigern. Die Einführung eines Assistenzsystems ist daher ein Bestandteil der Gestaltung des Arbeitssystems *Montage*. Im Rahmen dieses Abschnitts soll der Prozess zur Gestaltung von Arbeitssystemen nach DIN EN ISO 6385 dargestellt werden.

Im Speziellen können kognitive Assistenzsysteme den interaktiven Systemen zugeordnet werden. Interaktive Systeme sind eine „*Kombination von Hardware, Software und/oder Dienstleistungen, die Eingaben von einem (einer) Benutzer(in) empfängt und Ausgaben zu einem (einer) Benutzer(in) übermittelt*“ (DIN EN ISO 9241-210, S. 6). Eine der zentralen Eigenschaften eines interaktiven Systems ist dessen Gebrauchstauglichkeit.

Diese beschreibt das „*Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen*“ (DIN EN ISO 9241-210, S. 7). Um eine möglichst hohe Ausprägung der Gebrauchstauglichkeit für kognitive Assistenzsysteme zu gewährleisten, wird in diesem Abschnitt neben der Gestaltung von Arbeitssystemen auch auf die Gestaltung gebrauchstauglicher Systeme nach DIN EN ISO 9241-210 eingegangen.

2.4.2 Gestaltung von Arbeitssystemen

Für die Gestaltung von Arbeitssystemen ist in DIN EN ISO 6385 ein sechsstufiger Prozess beschrieben (Abbildung 9). Er besteht aus sechs sequenziellen Schritten, aber soll bei Bedarf iterativ durchgeführt werden.

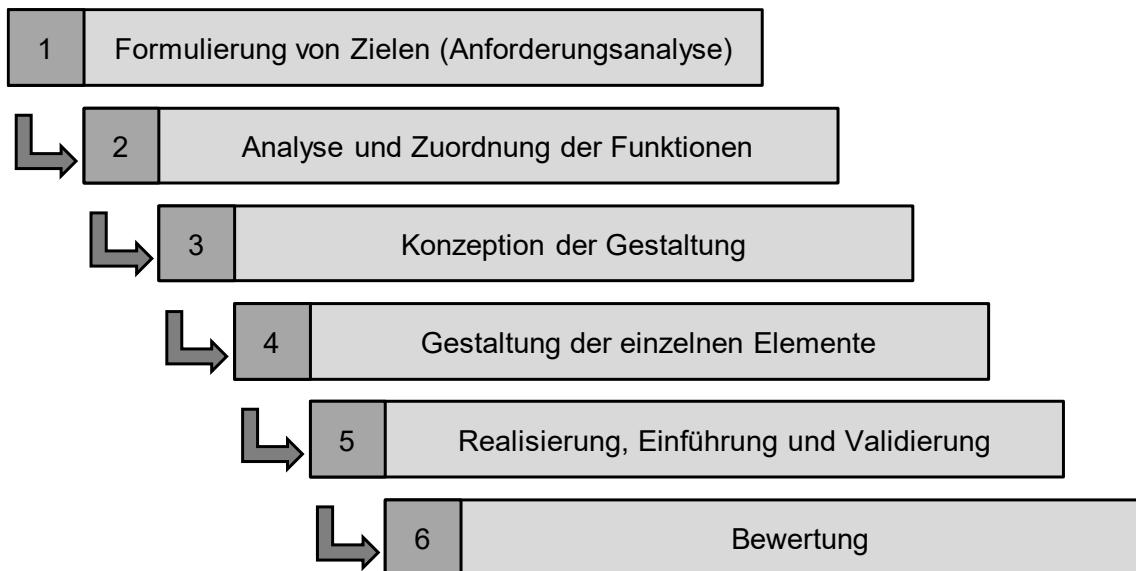


Abbildung 9: Prozess zur Gestaltung von Arbeitssystemen
(in Anlehnung an DIN EN ISO 6385)

In der Zielformulierung werden die zentralen Anforderungen für das Arbeitssystem ermittelt. Bei der Zuordnung der Funktionen wird die Aufteilung der Tätigkeiten zwischen dem Menschen und den Arbeitsmitteln festgelegt. Im Rahmen der Konzeption der Gestaltung werden den Funktionen konkrete Arbeitsmittel, Werkzeuge (inkl. Software), zugeordnet. Bei der Gestaltung der einzelnen Elemente werden Arbeitsorganisation, Arbeitsaufgaben, Tätigkeiten, Arbeitsumgebung, Arbeitsmittel sowie der Arbeitsraum und der Arbeitsplatz betrachtet. Im Anschluss erfolgt die Realisierung und eine Einweisung aller betroffenen Personen in das Arbeitssystem. Die Validierung soll zeigen, dass das neu gestaltete Arbeitssystem wie geplant funktioniert. Durch Kennwerte, die Leistung, Gesundheit, Wohlbefinden und Sicherheit umfassen, erfolgt eine Bewertung des Arbeitssystems (DIN EN ISO 6385).

Die Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage kann als Teilaspekt bei der Gestaltung eines Montagesystems gesehen werden. Aus der Anforderungsanalyse kann sich bspw. die Beherrschung von Variantenvielfalt ergeben, die in den Schritten 2 und 3 ein kognitives Assistenzsystem als Element fest-

legen, um alle Anforderungen zu erfüllen. Ab Schritt 4 würde die detaillierte Konzeptionierung und Umsetzung des Assistenzsystems erfolgen. Soll an einem bestehenden Montagesystem nachträglich ein Assistenzsystem eingeführt werden, können ebenfalls Elemente aus dem Prozess zur Gestaltung von Arbeitssystemen übertragen werden. Aufgrund der Position von Assistenzsystemen an der Mensch-Maschine-Schnittstelle soll hierfür der Blick im Folgenden auf weitere relevanten Normen gerichtet werden.

2.4.3 Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme

Als wichtigste Normenreihe zur Entwicklung von Bediensystemen wird die DIN EN ISO 9241 (Ergonomie der Mensch-Maschine-Interaktion) angesehen (ZÜHLKE 2012, S. 178). Diese beschreibt in 29 Teilen die Gestaltung von Software, Hardware und Arbeitsumgebung. Teil 11 umfasst dabei Begriffe und Konzepte bzgl. der Gebrauchstauglichkeit von Systemen (DIN EN ISO 9241-11). Grundsätze der Dialoggestaltung sind in Teil 110 der Normenreihe aufgeführt (DIN EN ISO 9241-110). Teil 125 gibt Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung (DIN EN ISO 9241-125). Für die Rückmeldung von Daten ist Norm 143 relevant, die Formulardialoge betrachtet (DIN EN ISO 9241-143).

Im Folgenden wird der Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme nach DIN EN ISO 9241-210 vorgestellt (Abbildung 10). Dieser Gestaltungsprozess ist *menschzentriert*. Dies beschreibt eine „*Herangehensweise bei der Gestaltung und Entwicklung von Systemen, die darauf abzielt, interaktive Systeme gebrauchstauglicher zu machen, indem sie sich auf die Verwendung des Systems konzentriert und Kenntnisse und Techniken aus den Bereichen der Arbeitswissenschaft/Ergonomie und der Gebrauchstauglichkeit anwendet*“ (DIN EN ISO 9241-210, S. 6). Dieser Prozess wird in der Literatur bereits im Kontext von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau (RICHTER 2018) sowie bei kognitiven Assistenzsystemen in der Produktion angewandt (SCHENK ET AL. 2016). Durch die menschzentrierte Gestaltung sollen Produktivität der Benutzer gesteigert und die Kosten für Schulung und Betreuung bzgl. des interaktiven Systems verringert werden. Durch den iterativen Ansatz wird die sogenannte User Experience verbessert und auftretender Stress reduziert. Generell dient der Prozess der Risikominimierung und soll die Wahrscheinlichkeit erhöhen, bei der Gestaltung des Systems im Termin- und Kostenplan zu bleiben (DIN EN ISO 9241-210).

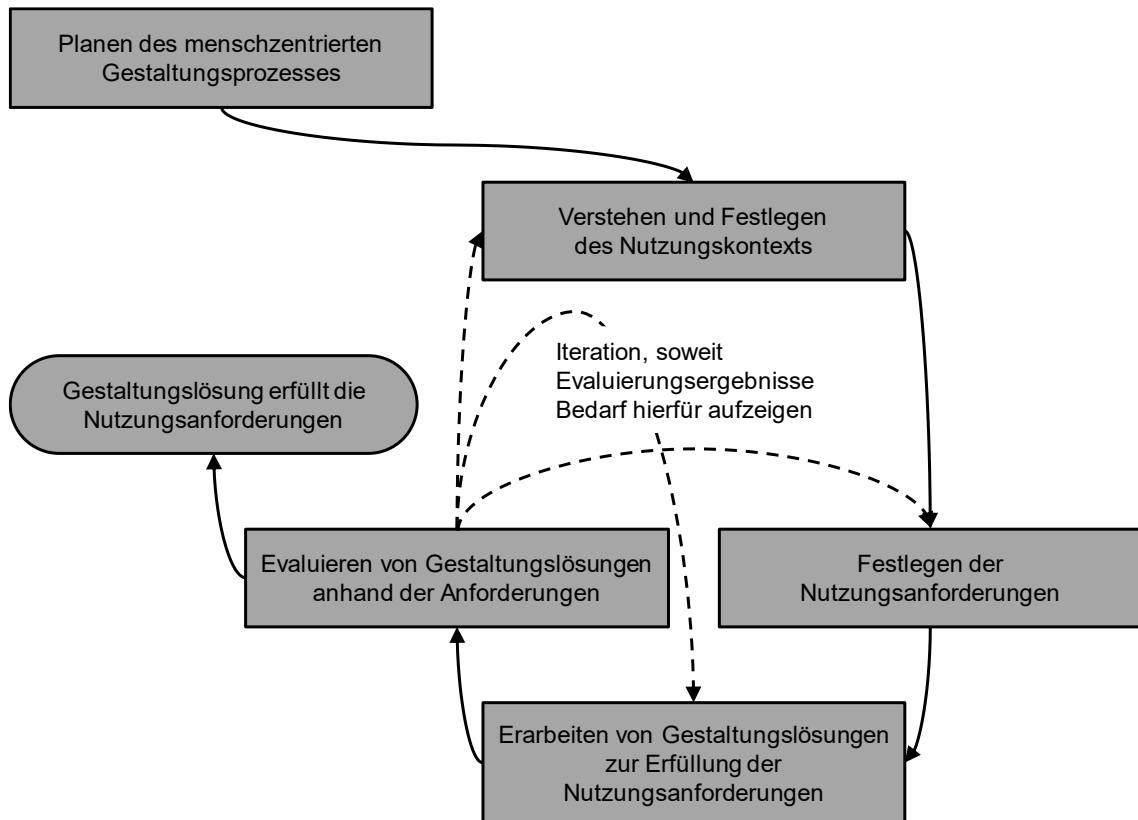


Abbildung 10 Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (DIN EN ISO 9241-210)

Der Prozess besteht aus fünf Phasen, die iterativ durchlaufen werden. Bei der Planung der menschenzentrierten Gestaltung werden alle Phasen des Lebenszyklus geplant und integriert, von Konzeption über Implementierung bis hin zur Wartung. Der eigentliche Entwicklungsprozess startet mit dem Verstehen und Beschreiben des Nutzungskontexts. Dieser enthält neben den Benutzern und sonstigen Interessensgruppen auch deren Merkmale, Ziele und Arbeitsaufgaben sowie die Umgebung des Systems. Hieraus werden im nächsten Schritt die Nutzungsanforderungen spezifiziert, welche die Grundlage für die Gestaltung und Bewertung des Systems festlegen. Schließlich werden Gestaltungslösungen entworfen, die die Nutzungsanforderungen erfüllen. Hierbei ist auch die Interaktion zwischen Benutzer und System zu gestalten. Im Anschluss erfolgt eine Evaluation der Gestaltungslösungen aus der Benutzerperspektive, um neue Informationen zu sammeln, Rückmeldungen zu Stärken und Schwächen der Lösung zu erhalten und um zu beurteilen, ob die Nutzungsanforderungen erreicht worden sind. Die hier gewonnenen Informationen dienen maßgeblich zur Auslösung von Iterationen (Abbildung 10). Der Prozess endet, sobald eine Evaluation eine Erfüllung der Nutzungsanforderungen durch die Gestaltungslösung zeigt (DIN EN ISO 9241-210).

2.5 Fazit

In der manuellen Montage wird die Flexibilität des Menschen genutzt, um die steigende Variantenvielfalt zu beherrschen. Hierfür sind Montagesysteme mit geeigneten Montagemitteln zu gestalten. Aufgrund der Bedeutung menschlicher Arbeit und des technischen Fortschritts in der Informationstechnik gewinnen kognitive Assistenzsysteme im Produktionsumfeld an Bedeutung. Die Ausführungen in diesem Kapitel zeigen, dass im Industrieumfeld bereits zahlreiche Technologien etabliert sind und forschungsseitig an zahlreichen innovativen Zukunftstechnologien gearbeitet wird. Auf der technischen Seite werden umfangreiche IT-Kenntnisse benötigt, um die Hardware- und Softwarekomponenten eines Assistenzsystems zu gestalten. Innerhalb der Produktionstechnik muss die manuelle Montage mit ihren zahlreichen Ausprägungsformen und Herausforderungen verstanden werden. Erst wenn durch eine Optimierung der Gestaltung, bspw. durch eine montagegerechte Konstruktion, vorhandene Herausforderungen nicht behoben werden können, sollte auf ein kognitives Assistenzsystem gesetzt werden.

Die Einführung von Assistenzsystemen in der manuellen Montage ist jedoch keine rein technische, sondern eine interdisziplinäre Aufgabenstellung. In der Literatur wird häufig davon gesprochen den „Anwender in den Mittelpunkt des Entwicklungsprozesses zu stellen“ (LANZA ET AL. 2018, S. 46), da der „arbeitende Mensch weiterhin im Mittelpunkt stehen wird“ (SPATH ET AL. 2013, S. 2). Es sind daher arbeitswissenschaftliche bzw. arbeitspsychologische Erkenntnisse in den Einführungsprozess mit einzubringen, um die Akzeptanz und damit den wirtschaftlichen Erfolg des Assistenzsystems sicherzustellen. Ermüdung durch den Einsatz von Displays oder Datenbrillen, mögliche Ängste vor Fehlbedienungen sowie eine unterschiedliche Lerngeschwindigkeit der Nutzer müssen rechtzeitig erkannt werden, um wirksame Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Zusätzlich ist die Anwendung betriebswirtschaftlicher Methoden notwendig, um die Investitionsentscheidung im Rahmen des Einführungsprozesses abzusichern. Juristische Fragestellungen müssen ebenfalls berücksichtigt werden, bspw. das Mitbestimmungsrecht durch § 87 Absatz 1 Nr. 6 BetrVG. Zudem sind bei der Verwendung personenbezogener Daten die relevanten datenschutzrechtlichen Normen einzuhalten.

Um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen, soll im folgenden Kapitel der Blick gezielt auf Forschungsarbeiten gerichtet werden, die sich bereits mit Herausforderungen in der Montage und den vielfältigen Unterstützungsmöglichkeiten kognitiver Assistenzsysteme beschäftigt haben.

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Übersicht

Im folgenden Kapitel werden die nach dem aktuellen Stand von Forschung und Technik für diese Arbeit relevanten wissenschaftlichen Publikationen diskutiert. Es soll analysiert werden, inwiefern sich aus bestehenden Methoden Assistenzfunktionen ableiten lassen können. Hierfür finden sich in Abschnitt 3.2 bestehende Methoden zur Bewertung der Komplexität in der manuellen Montage. Welche technologischen Lösungen zur Mitarbeiterunterstützung eingesetzt werden können, wird in Abschnitt 3.3 betrachtet. Dazu werden unterschiedliche Klassifizierungsansätze für kognitive Assistenzsysteme aufgezeigt. Weiterhin wird die Literatur nach bestehenden Ansätzen zur Mitarbeiterbindung analysiert. Hierfür wird in Abschnitt 3.4 auf Methoden zur Akzeptanzbewertung eingegangen. Zur Untersuchung welche wirtschaftlichen Aspekte bei der Auswahl kognitiver Assistenzsysteme berücksichtigt werden, werden im darauffolgenden Abschnitt 3.5 Arbeiten vorgestellt, die sich bereits mit der methodischen Auswahl von kognitiven Assistenzsystemen beschäftigen. Im Abschnitt 3.6 erfolgt eine Bewertung der dargestellten Artikel im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit. Der hier ermittelte Handlungsbedarf bildet die Basis für die Modell- und Methodenentwicklung in den darauffolgenden Kapiteln.

3.2 Komplexitätsbewertung in der manuellen Montage

3.2.1 Komplexitätstreiber in der Produktion

Hohe Komplexität ist eine der größten Herausforderungen für produzierende Unternehmen (ELMARAGHY ET AL. 2012). Für den Umgang mit Komplexität stehen die Strategien der Komplexitätsvermeidung, Komplexitätsreduktion sowie der Komplexitätsbeherrschung zur Verfügung (BRANDES & BRANDES 2013, WILDEMANN 2017). Eine Komplexitätsvermeidung steht häufig im Zielkonflikt mit der Erfüllung von Kundenanforderungen. Eine Reduzierung der Komplexität in der Produktion kann durch ein Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung erzielt werden (LINDEMANN ET AL. 2009). Die Beherrschung der Komplexität kann durch digitale Systeme erfolgen. In der manuellen Montage erfolgt dies durch kognitive Assistenzsysteme.

Die Ursachen von Komplexität sind vielfältig. ADAM (1998) gliedert Komplexität von produzierenden Unternehmen in die Dimensionen Zielkomplexität, Kunden- und Variantenkomplexität, Teile- und Fertigungssystemkomplexität sowie Koordinationskomplexität. In einem systematischen Literaturüberblick haben VOGEL & LASCH (2016) 235 Quellen im Zeitraum von 1991 bis 2015 analysiert, die sich mit Komplexitätstreibern in der Produktion beschäftigen. Die in der Literaturrecherche identifizierten Komplexitätstreiber wurden in ein Klassifikationsschema (Abbildung 11) eingeordnet. Hierbei wird zentral zwischen externer und interner Komplexität unterschieden.

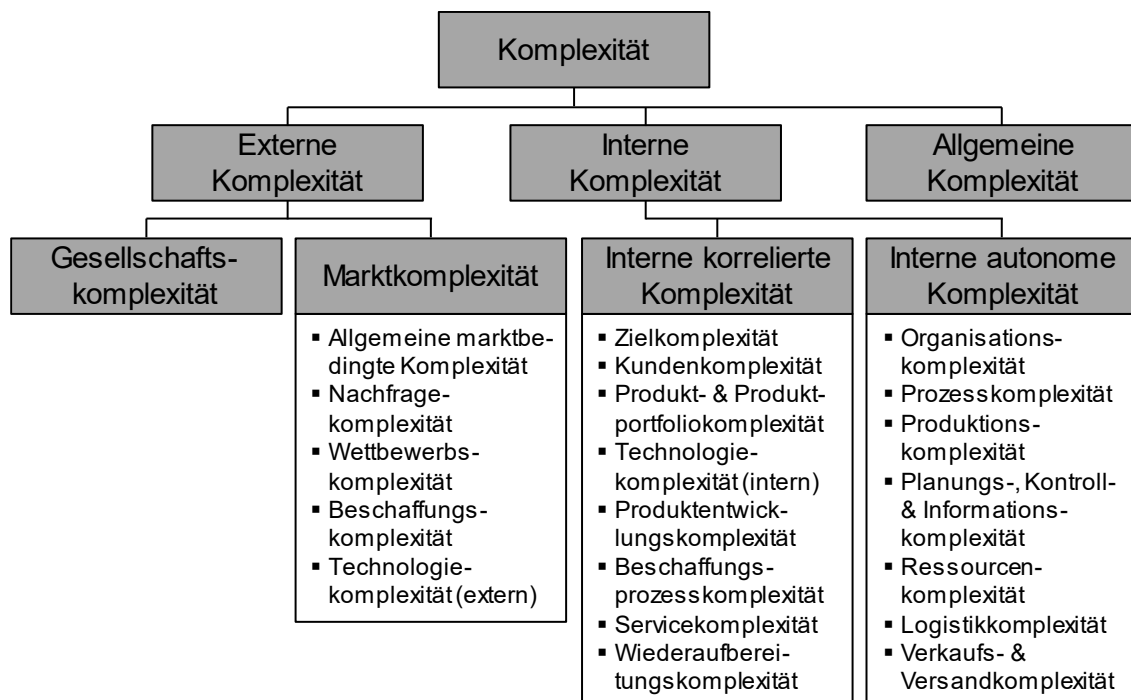


Abbildung 11: Klassifikationssystem für Komplexitätstreiber
(in Anlehnung an VOGEL & LASCH 2016)

Zur Bewertung von Komplexität im Produktionsumfeld existieren zahlreiche Mess- und Modellierungsansätze über die BEDNAR & MODRAK (2014) einen Überblick geben. Im Folgenden sollen ausgewählte Ansätze vorgestellt werden, die die manuelle Montage fokussieren.

3.2.2 Modellierung von Komplexität in der manuellen Montage

SAMY & ELMARAGHY (2010) haben eine Berechnungsmethode entwickelt, um die Komplexität von Montagevorgängen zu bewerten. Für jedes Bauteil der Montage

3.2 Komplexitätsbewertung in der manuellen Montage

werden Handhabungs- und Fügeprozess bewertet. Für die manuelle und automatisierte Montage wurde jeweils ein Tabellenwerk geschaffen, aus dem auf Basis von geometrischen Kriterien und weiteren Charakteristika der Montage einzelne Schwierigkeitsfaktoren zugeordnet werden. Für jedes Teil werden daraus der Komplexitätsfaktor für die Handhabung sowie der Komplexitätsfaktor für das Fügen berechnet. Diese werden zu einer Teilkomplexität aggregiert. Aus den Komplexitäten der einzelnen Teile wird schließlich die Produktkomplexität berechnet. Diese Methode kann als Feedback für die Konstruktion genutzt werden, um durch eine montagegerechte Konstruktion einen möglichst geringen Produktkomplexitätswert zu erzielen.

Ein kausales Komplexitätsmodell zur Bewertung der Arbeitsplatzkomplexität wird in ZELTZER ET AL. (2012) sowie ZELTZER ET AL. (2013) vorgestellt. Im Rahmen von Workshops wurden elf Komplexitätstreiber ermittelt. Diese umfassen u.a. die Anzahl der benötigten Werkzeuge, den Abstand zu den Teilen und die Anzahl der Varianten pro Produkt. Für diese elf Komplexitätstreiber wurden Antwortmöglichkeiten aus einem vierstufigen Skalenmodell zugeordnet. Damit wurde jeder Komplexitätstreiber mit einem Wert von eins bis vier bewertet und daraus schließlich ein gewichteter Mittelwert berechnet. Im Rahmen von Versuchen wurden Arbeitsplätze bewertet und zusätzlich durch eine subjektive Einschätzung von Experten in Arbeitsplätze mit niedriger und hoher Komplexität eingeordnet. Der Vergleich von berechneten objektiven Komplexitäten und subjektiver Einschätzung ergab eine Übereinstimmung von 82 %. Durch statistische Analysen konnten die elf Komplexitätstreiber reduziert werden. Zwei Berechnungsmodelle, die jeweils vier der elf Komplexitätstreiber berücksichtigten, erreichten eine Übereinstimmung von 84,2 % und 81,6 %. In beiden Modellen wurden die Komplexitätstreiber „Anzahl verschiedener Behälter“, „Anzahl unterschiedlicher Teile in der Arbeitsstation“ sowie „Anzahl unterschiedlicher Montagepositionen des Mitarbeiters“ genutzt.

FALCK ET AL. (2016) nutzen 16 Kriterien, um die Komplexität in der manuellen Montage zu bewerten. Die 16 Kriterien werden mit jeweils zwei Aussagen beschrieben, welche eine Ausprägung des Kriteriums mit hoher bzw. niedriger Komplexität beschreiben. Beispielsweise wird in Kriterium zwölf abgefragt, ob eine Montagevorrichtung eingestellt werden muss. Ist dies der Fall, wird Kriterium 12 mit höher Komplexität bewertet, ansonsten mit niedriger. Ergebnis dieser Methode sind 16 Binärvariablen bzw. ein summierter Wert zwischen 0 und 16 (FALCK ET AL. (2017)).

ZHU ET AL. 2008 entwickelten zur Komplexitätsbewertung die Operator Choice Complexity (OCC), die die Freiheitsgrade von Montagemitarbeitern in variantenreichen Montagesystemen bewertet. Es kann sowohl eine Bewertung einzelner Stationen als auch von vollständigen Montagelinien erfolgen. Ziel ist, in einer frühen Phase auf das Produkt Einfluss zu nehmen und die Ergebnisse für die Produktionsplanung, im Speziellen für die Reihenfolgebildung, zu nutzen. WANG & HU (2010) verwenden diesen Wert, um die Konfiguration der Supply Chain zu optimieren.

3.2.3 Bewertung des Assistenzbedarfs in der manuellen Montage

Die dargestellten Methoden zur Komplexitätsbewertung in der manuellen Montage berücksichtigen zahlreiche Faktoren und sind in ihrer Anwendung aufwendig. Ihre primäre Verwendung betrifft häufig die Bewertung eines Produkts bzw. Alternativen während des Produktentstehungsprozesses, da sich während dieser Phase noch viele der Einflussfaktoren zu Gunsten einer geringeren Komplexität gestalten lassen. Im Hinblick auf Assistenzsysteme sind diese Modelle nur bedingt anwendbar. Sie können aber beispielsweise genutzt werden, um diejenigen Arbeitsplätze zu identifizieren, die den höchsten Unterstützungsbedarf benötigen. Zudem können die Lebenszyklen von Assistenzsystemen höher sein als die Produktlebenszyklen der am Montagearbeitsplatz zu montierenden Produkte. Daher soll im Folgenden der Fokus auf spezifischere Modelle gelegt werden, die den Assistenzbedarf bewerten.

MATTSSON ET AL. (2012) entwickelten die Methode des *Complexity Index (CXI)*. Dieser bewertet die Komplexität in den fünf Gebieten Produktvarianten, Arbeitsinhalt, Layout und Werkzeuge, Unterstützung und Arbeitsanweisungen sowie generelle Aspekte. Mithilfe von 21 Fragen, die auf einer Likert-Skala beantwortet werden, können Arbeitsstationen in fünf Dimensionen bewertet werden. Ergebnis ist eine Visualisierung in Form einer Matrix über fünf Komplexitätsdimensionen der bewerteten Arbeitsstationen in denen die Komplexitäten in rot, gelb oder grün hervorgehoben sind. Auf Basis dieser Matrix können Verbesserungsmaßnahmen, z. B. Assistenzsysteme, abgeleitet werden.

ZÄH ET AL. (2009) entwickelten ein Bewertungssystem für den Assistenzbedarf in der manuellen Montage, welches aus drei Elementen besteht. Diese enthalten zeitliche, kognitive sowie wissensbasierte Einflüsse auf den Werker. Für das zeitliche Element wird die Montagezeit berücksichtigt. Sofern keine Messwerte vorliegen,

kann eine Bestimmung durch MTM (SYSKA 2006) erfolgen. Das kognitive Element wird durch die mentale Beanspruchung mittels Wahrnehmung, Entscheidung sowie Ausführung der Montageaufgabe bewertet. Das wissensbasierte Element soll abbilden, inwiefern Gemeinsamkeiten und Ähnlichkeiten zwischen den Produkten im Produktionsprogramm bestehen. Im besten Fall wird diese Analyse automatisiert über 3D-CAD Daten durchgeführt.

CLAEYS ET AL. (2015) entwickelten ein umfangreiches Framework zur Bestimmung des kognitiven Unterstützungsbedarfs in der variantenreichen manuellen Montage. Dieses Modell umfasst extrinsische Aspekte, die eine Bewertung von Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität enthalten sowie intrinsische Aspekte, die individuelle Mitarbeitereigenschaften berücksichtigen. Für die Bewertung der Produktkomplexität verweisen CLAEYS ET AL. (2015) auf die Arbeiten von SAMY & ELMARAGHY (2010). Bei der Bewertung der Arbeitsplatzkomplexität wird auf ZELTZER ET AL. (2012) sowie ZHU ET AL. (2008) verwiesen. Bei den intrinsischen Faktoren werden persönliche Mitarbeitereigenschaften (z. B. Alter, Intelligenzquotient), Erfahrungsfaktoren (z. B. Wissen, Know-how) sowie konditionelle Belastungsfaktoren (z. B. Stress, Erschöpfung) berücksichtigt. CLAEYS ET AL. (2015) stellen diese Einflussfaktoren modellhaft ohne eine Berechnungsvorschrift dar, um diese zu quantifizieren.

3.3 Klassifizierung kognitiver Assistenzsysteme

3.3.1 Autonomiegrad von Assistenz

Nachdem in Kapitel 2 der Begriff des Assistenzsystems eingeführt wurde und die Unterteilung zwischen kognitiven und physischen Assistenzsystemen dargestellt worden ist, soll in diesem Abschnitt eine detaillierte Betrachtung der kognitiven Assistenz erfolgen. Hierzu existieren zahlreiche Modelle, die den Autonomiegrad des Assistenzsystems beschreiben.

WANDKE (2005) führte ein sechsstufiges System der Assistenz ein. Diese sechs Stufen sind:

1. Motivierung, Aktivierung und Zielvorgabe
2. Wahrnehmung
3. Informationsverknüpfung
4. Treffen von Entscheidungen, Auswahl der Handlung

3 Stand der Forschung und Technik

5. Ausführung der Handlung
6. Verarbeitung von Feedback aus den durchgeführten Handlungen

Bezogen auf technische Anwendungsfälle umfasst die erste Stufe beispielsweise eine Warnung durch das Assistenzsystem. Die Wahrnehmung kann durch eine besonders auffällige Hervorhebung erfolgen. Eine Informationsverknüpfung durch Assistenzsysteme kann durch das Bereitstellen zusätzlicher Erklärungen erfolgen. Die dritte Stufe der Assistenz kann in der Montage erfolgen indem bei einem vorliegenden Problem die durchzuführende Maßnahme vorgegeben wird. Die Ausführungsassistenz kann im kognitiven Bereich bspw. die Durchführung von Dokumentationstätigkeiten umfassen. Hier wird die Aufgabe durch das Assistenzsystem anstelle eines handschriftlichen Protokolls durchgeführt. Die Verarbeitung von Feedback kann bspw. durch eine integrierte Qualitätskontrolle erfolgen.

BLUTNER ET AL. (2009) stellen sechs Varianten der Entscheidungsunterstützung vor:

1. Erzeugen und Aufbereiten (inkl. Filtern) von Informationen
2. Erzeugen von Alternativen (Transformation von Daten in Entscheidungsalternativen.)
3. Bewerten von Alternativen (Bewertungskriterien durch den Menschen festgelegt)
4. Auswählen von Alternativen (Entscheidung)
5. Überwachen der Entscheidungsausführung (Einhaltung der Zielkriterien)
6. Kontrollieren der Entscheidungsausführung

Für alle sechs Varianten der Entscheidungsunterstützung ist eine Durchführung durch die IT oder den Menschen möglich. Zudem ist eine im Prozessverlauf veränderliche Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine möglich. Gerade bei den Varianten vier, fünf und sechs ist eine hohe Übereinstimmung mit dem Modell nach WANDKE (2005) erkennbar.

3.3.2 Typologien kognitiver Assistenzsysteme im Produktionsumfeld

Nach BENGLER ET AL. (2017) umfasst ein kognitives Assistenzsystem die Aufgaben der Wahrnehmung und des Entscheidens. Die Unterstützung bei der Ausführung wird den physischen Assistenzsystemen zugeordnet.

AEHNELT & BADER (2015) stellen sechs Teilaufgaben für die Informationsassistenz bei der Montage dar. Diese umfassen Kontexterfassung, Situationserkennung,

Informationsbedarfsermittlung, Informationssynthese, Informationsvisualisierung sowie Informationsrückmeldung.

TEUBNER ET AL. (2019) unterscheiden zwischen dynamischer und individueller Werkerinformation. Die dynamische Werkerinformation ist dadurch gekennzeichnet, dass Informationen auftragspezifisch dargestellt werden und auf aktuelle Änderungen hinweisen. Sie gibt Hinweise auf häufige Fehler und bietet die Möglichkeit, Produkte oder Prozesse zu kommentieren. Individuelle Werkerinformation soll rollenspezifische Informationen qualifikationsgerecht darstellen. Das Lernen am Arbeitsplatz soll unterstützt werden und über den individuellen Fortschritt soll Transparenz herrschen.

Neben einer kognitiven Assistenz bei der Ausführung ist auch eine Integration von Lernsystemen möglich (HAASE ET AL. 2015). Anstelle von virtuellen Lernumgebungen können Qualifizierungsaufgaben mittels lernförderlicher Arbeitsmittel durchgeführt werden.

APT ET AL. (2018B) teilen kognitionsunterstützende Assistenzsysteme in die drei Kategorien Hilfesysteme, adaptive Assistenzsysteme sowie tutorielle Assistenzsysteme ein. Mit Hilfesystemen werden Systeme beschrieben, die analoges Wissen in digitaler Form bereitstellen und bspw. Arbeitsanweisungen digital darstellen. Ein Assistenzsystem wird als adaptiv bezeichnet, wenn abhängig von Arbeitsvorgängen oder des jeweiligen Nutzers eine automatische Anpassung der Assistenz erfolgt. Dies umfasst bspw. Pick-by-Light-Systeme oder eine Möglichkeit der Sprachanpassung. Ein tutorielles Assistenzsystem muss neben den Voraussetzungen eines adaptiven Assistenzsystems noch zusätzliche Anforderungen bzgl. der Lernförderlichkeit erfüllen, um arbeitsrelevantes Wissen zu vermitteln.

Sollen Assistenzsysteme adaptiv gestaltet werden und auf die individuellen Kompetenzen der Nutzer eingehen, sind Benutzerprofile notwendig. GALASKE & ANDERL (2016) zeigen Datenmodelle, mit denen eine Identifizierung der Nutzer, eine Beschreibung des Kompetenzprofils sowie eine Beschreibung der ergonomischen Anforderungen möglich ist. DOLLINGER & REINHART (2016) entwickelten ein System aus Mitarbeiter- und Arbeitsplatzprofilen, um Mitarbeiter mittels Springereinsätzen zu qualifizieren.

In der Literatur werden Assistenzsysteme häufig in die Kategorien optische, akustische und haptische Assistenzsysteme eingeteilt (KASSELMANN & WILLEKE 2016, SOCHOR ET AL. 2019A). Hierbei ist jedoch anzumerken, dass diese Unterteilung lediglich die Ausgabe von Informationen an den Mitarbeiter beschreibt. Andere

Aspekte des Assistenzsystems wie Autonomiegrad oder Eingabemöglichkeiten bleiben hier unberücksichtigt. Für tragbare Bediengeräte (engl. Wearables) bestehen weitere Unterteilungen, die diese bspw. nach dem Anbringungsort (ZIEGLER 2016) beschreiben.

3.4 Akzeptanz kognitiver Assistenzsysteme

3.4.1 Akzeptanzdimensionen und Mitarbeiterpartizipation

Innerhalb dieses Abschnitts wird auf den Begriff der Akzeptanz und dessen mögliche Ausprägungen eingegangen. Um Akzeptanz zu erhöhen, soll auf Möglichkeiten der Mitarbeiterpartizipation bei Veränderungsprozessen eingegangen werden.

Bei der Akzeptanzforschung geht es um die Annahme von neuen Produkten und Dienstleistungen und deren anschließende Nutzung (KOLLMANN 1998). In der Literatur wird Akzeptanz definiert als „*ein Phänomen, das von einer Gruppe oder Person, dem Akzeptanzsubjekt, ausgeht, sich auf Akzeptanzobjekte (...) bezieht und sich in einem sowohl von Akzeptanzsubjekt als auch Akzeptanzobjekt bestimmten Umfeld, dem Akzeptanzkontext, ausprägt*“ (HÜSING ET AL. 2002, S. 24). Im Kontext kognitiver Assistenzsysteme sind als Akzeptanzsubjekt die Montagemitarbeiter, als Akzeptanzobjekt das Assistenzsystem und als Akzeptanzkontext das gesamte Arbeitssystem zu verstehen.

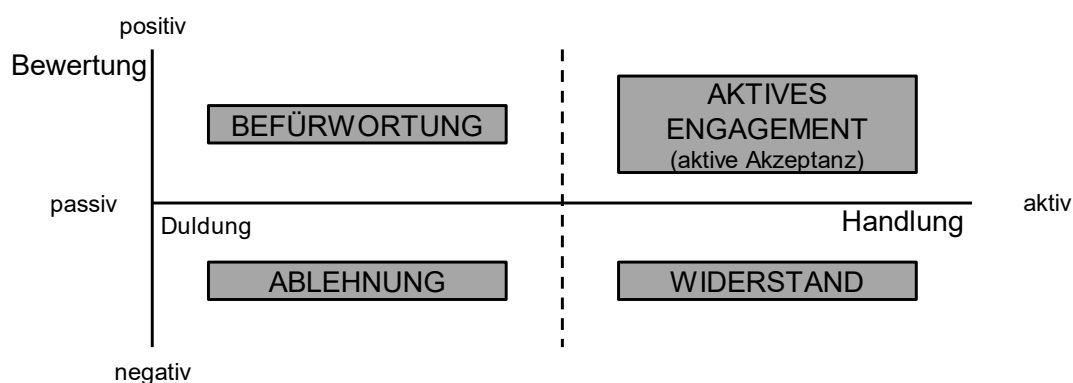


Abbildung 12: Dimensionen des Akzeptanzbegriffs
(in Anlehnung an SCHWEIZER-RIES ET AL. 2008)

SCHWEIZER-RIES ET AL. (2008) ordnen den Akzeptanzbegriff innerhalb der Kategorien „Bewertung“ und „Handlung“ ein (Abbildung 12). Wird ein Objekt negativ

bewertet und passiv gehandelt, wird von einer „Ablehnung gesprochen“. Wird dagegen aktiv gehandelt wird diese Ausprägung als „Widerstand“ bezeichnet. Sofern ein Objekt positiv gewertet wird, ist bei fehlender Handlung von „Befürwortung“, bei aktivem Handeln von „Unterstützung“ bzw. „Engagement“ zu sprechen, was auch als „aktive Akzeptanz“ bezeichnet wird.

Bei der Akzeptanz automatisierter Systeme ordnen PARASURAMAN & RILEY (1997) die Akzeptanz in die vier Kategorien „Use“, „Misuse“, „Disuse“, „Abuse“ ein. Beim Gebrauch („Use“) liegt eine Akzeptanz des Systems vor und es wird in seiner konzipierten Form genutzt. Wird sich hingegen blind auf eine Automatisierung verlassen, ohne bei Bedarf manuell einzugreifen, wird von einem Fehlgebrauch („Misuse“) gesprochen. Ursache hierfür kann ein zu hohes Vertrauen in das System sein. Bei einem Nichtgebrauch („Disuse“) mangelt es an Akzeptanz, was sich bspw. durch das Ignorieren von Warnsignalen technischer Systeme zeigt, wenn diese in der Vergangenheit einen Fehlalarm ausgelöst hatten. Von einem „Missbrauch“ („Abuse“) wird gesprochen, wenn ein automatisiertes System eigenständig handelt, die Verantwortung für das System aber beim Nutzer liegt und die Entscheidungswege des automatisierten Systems nicht nachvollzogen werden können. (PARASURAMAN & RILEY 1997). Während bspw. in der Marktforschung für Konsumgüter aufgrund der Freiwilligkeit die Nutzung mit der Akzeptanz gleichgesetzt werden kann, sind diese Begriffe bei vorgeschriebener Nutzung im betrieblichen Umfeld zu differenzieren. Hierbei kann eine Nutzung trotz fehlender Akzeptanz vorliegen. Dieser Zustand sollte durch den Einführungsprozess bereits vorab vermieden werden.

Um die Akzeptanz bei Veränderungsprozessen zu erhöhen, gilt es, Mitarbeiter in den Veränderungsprozess einzubinden. WEGGE (2004) definieren fünf Stufen der Mitarbeiterereinbindung:

1. Keine Partizipation
2. Information
3. Konsultation
4. Mitwirkung
5. Mitbestimmung

Der Grad der Einbindung der Mitarbeiter steigt mit den Stufen an. Ab Stufe zwei erfolgt eine Information der Mitarbeiter. Eine Beteiligung an Entscheidungen ist ab der dritten Stufe möglich. Sofern dies nach formellen oder informellen Regeln erfolgt, wird von einer „Mitwirkung“ gesprochen. Bei einer gleichberechtigten Entscheidung aller Arbeitnehmer wird von „Mitbestimmung“ gesprochen.

3 Stand der Forschung und Technik

Die Akzeptanzfrage soll nicht erst nach dem Abschluss einer technischen Entwicklung gestellt werden (QUIRING 2006). Hierfür hat QUIRING (2006) eine Checkliste entwickelt, die eine methodologische Begleitung des Akzeptanzprozesses darstellt. Den angewandten Methoden (Tabelle 1) sind sechs Stadien des Akzeptanzprozesses zugeordnet. Betrachtungsrahmen ist die Einführung neuer Produkte mit interaktiven Medientechnologien.

Tabelle 1: Methodologische Begleitung des Akzeptanzprozesses mit beispielhaften Methoden in Anlehnung an QUIRING (2006)

Stadium	Beispielhafte Methode
1. Ideensammlung	Sekundäranalysen
2. Ideenentwicklung	Leitfadeninterviews
3. Umsetzung in Prototypen	Laborstudien
4. Pilotprojekte	Leitfadeninterviews
5. Markteinführung	Logfiletracking
6. Marktetablierung	standardisierte Befragung

3.4.2 Bewertungsmodelle für Technologieakzeptanz und Gebrauchstauglichkeit

Zur Bewertung von Technologieakzeptanz und Gebrauchstauglichkeit existieren in der Literatur zahlreiche Modelle. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Überblick über Modelle gegeben werden, die auch für die Akzeptanzbewertung von kognitiven Assistenzsystemen genutzt werden können.

Zu den ersten Modellen zur Vorhersage des Nutzungsverhaltens zählt die Theory of Reasoned Action (TRA) (FISHBEIN & AJZEN 1975). Auf Basis der persönlichen Einstellung und subjektiver Normen wird auf die Nutzungsabsicht geschlossen, also eine Prognose für die zukünftige Nutzung gegeben. Dieses Modell wurde um eine wahrgenommene Verhaltenskontrolle erweitert und zur Theory of Planned Behavior (TPB) (AJZEN 1991) weiterentwickelt.

Zur Bewertung der wahrgenommenen Akzeptanz werden im Technology Acceptance Model (TAM) neben dem erwarteten Nutzen der erwartete Aufwand herangezogen (DAVIS 1989). In einer Metaanalyse von WAGNER (2016) ist das TAM mit 89 Verwendungen bei 116 untersuchten Studien das meistgenutzte Modell.

Durch die Aufnahme weiterer Einflussvariablen (z. B. subjektive Norm, Wahrnehmung externer Kontrolle) wurde das TAM zu einem TAM II (VENKATESH & DAVIS 2000) sowie einem TAM III (VENKATESH & BALA 2008) weiterentwickelt.

Eine weitere Theorie, die mehrere bisherige Erklärungsansätze vereinen soll, stellt die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) dar (VENKATESH ET AL. 2003). Sie nutzt die Erklärungsvariablen Leistungserwartung, Aufwandsersparnis, sozialen Einfluss sowie Einsatzbedingungen. Diese werden mit den indirekten Variablen Geschlecht, Alter, Erfahrung und Freiwilligkeit kombiniert, um auf die Nutzungsabsicht sowie die tatsächliche Nutzung zu schließen.

Als Analyseverfahren für die Gebrauchstauglichkeit kann die System Usability Scale (SUS) genannt werden (BROOKE 1996). Mit ihr kann eine Aussage darüber getroffen werden, inwiefern ein vorliegendes System als gebrauchstauglich erachtet werden kann. Zur Durchführung wird eine Auswahl der zukünftigen Nutzergruppe, eine Auswahl der zu erledigenden Aufgaben sowie die Charakteristiken des physischen, organisatorischen und sozialen Umfelds des Systems benötigt. Auf dieser Basis wird ein Usability-Test durchgeführt, welcher im Anschluss mittels eines Fragebogens ausgewertet wird. Diese Befragung umfasst zehn Fragen, die mittels einer fünf- oder siebenstufigen Likert-Skala beantwortet werden (BROOKE 1996). Die erreichten Punkte können zu einem SUS-Score verrechnet werden. Es existieren Tabellenwerke (SAURO 2011) mit denen der SUS-Score in ein amerikanisches Schulnotensystem von A bis F überführt werden kann. Ab Note A mit einem SUS-Score von 80,3 liegt ein Wert vor, bei dem von einer Weiterempfehlung des Systems durch die Nutzer ausgegangen werden kann. Der SUS-Score wurde bereits im Zusammenhang mit kognitiven Assistenzsystemen angewandt, um eine projektionsbasierte Werkerinformation zu bewerten (HINRICHSEN ET AL. 2017).

Nach der Betrachtung von Komplexitätsbewertungen, Klassifizierungen und Akzeptanzbewertung soll im folgenden Abschnitt der Fokus auf ganzheitliche Auswahlverfahren für kognitive Assistenzsysteme gerichtet werden.

3.5 Auswahlverfahren für kognitive Assistenzsysteme

3.5.1 Durchgängige Mitarbeiterinformation nach LANG (2007)

Als eine der ersten Dissertationen im Themenfeld der kognitiven Assistenzsysteme ist die von LANG (2007) zu nennen. Sie befasst sich mit einer durchgängigen Information von Produktionsmitarbeitern zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit. LANG (2007) geht in seiner Arbeit auf eine ergonomische Gestaltung von Arbeitsanweisungen, einen effizienten Erstellungs- und Pflegeprozess für Produktionsdokumente und die Gestaltung einer IT-basierten Informationsdistribution in der Produktion ein.

Bei der Erstellung von Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung von Arbeitsanweisungen kombiniert LANG (2007) bestehende Vorgehensweisen zur Gestaltung technischer Dokumente mit Anregungen aus bereits bestehenden industriellen Anleitungen sowie Richtlinien zur ergonomischen Layout- und Textgestaltung. Es wurde sowohl eine Richtlinie für papiergebundene Arbeitsanweisungen als auch eine Richtlinie für die IT-gestützte Darstellung von Arbeitsanweisungen geschaffen. Diese Richtlinien bestehen jeweils aus Handlungsempfehlungen zur Gestaltung von Text- und Bildinformationen, die mittels Abbildungen zu Layoutvorschlägen veranschaulicht werden.

Im Rahmen des Prozesses zur Erstellung und Pflege von Produktionsdokumenten zeigt LANG (2007) die Nachteile herkömmlicher Textverarbeitungsprogramme auf und motiviert den Bedarf für eine eigens zur Erstellung und Pflege von Arbeitsanweisungen gestaltete Benutzeroberfläche. Hierfür wird ein Datenmodell aufgestellt, mit dem Arbeitsanweisungen modelliert werden können. Für die Texterstellung werden Methoden aufgezeigt, wie Anweisungstexte teilautomatisiert erstellt werden können, indem auf bereits bestehende Anweisungselemente zurückgegriffen wird.

Im Themenfeld der IT-basierten Informationsbereitstellung stellt LANG (2007) eine IT-Struktur vor, die aus einem zentralen Server besteht, der Daten mit den unterstützenden Produktionsbereichen und administrativen Bereichen austauscht, die Anweisungen erstellen und auch pflegen. Als Vorteile IT-basierter Informationsbereitstellung werden u.a. die Möglichkeit zur mitarbeiterspezifischen Informationsbereitstellung als auch die Möglichkeit zur Anbindung von Peripheriegeräten genannt. Zudem wurde ein prototypischer Softwaredemonstrator entwickelt.

Die Arbeit von LANG (2007) zeigt wesentliche Aspekte auf, die beim Einsatz kognitiver Assistenzsysteme berücksichtigt werden müssen. Es erfolgt eine allgemeine Darstellung der Thematik für alle Anwendungsfälle in der Produktion. Eine spezifische Betrachtung von Aspekten einzelner Arbeitsplätze (z. B. Fertigung, Montage, Logistik) findet nicht statt. Es wird eine reine Bereitstellung von Informationen thematisiert. Ein bidirektionaler Informationsfluss, der auch die digitale Dokumentation von Produktionsprozessen ermöglicht, ist nicht vorgesehen.

3.5.2 Werkerassistenz und -qualifizierung durch Visualisierung nach POSTAWA (2014)

POSTAWA (2014) zeigt ein Konzept zur Werkerassistenz und -qualifizierung in der Montage. Die Informationen werden visuell, durch bild- und schriftgestützte Darstellungen, bereitgestellt. Ziel ist es, Personen ohne berufsqualifizierenden Abschluss einen Zugang in den industriellen Arbeitsmarkt zu ermöglichen. Das dazugehörige Konzept setzt dabei auf ein Planungs-, ein Ausführungs- sowie ein Bewertungsmodul (Tabelle 2). Im Planungsmodul wird die Arbeitsaufgabe festgelegt und Arbeitsplan, Arbeitsobjekte sowie Arbeitsmittel bestimmt. Diese Inhalte werden von einem Experten, dem Werker oder automatisiert erstellt. Das Ausführungsmodul stellt die benötigten Informationen dar. Im Falle eines Assistenzsystems erfolgt dies durch kommunikationstechnische Systeme mittels Visualisierung. Das Bewertungsmodul dient zur Bestimmung der observierbaren und messbaren Leistung. Dies kann durch eine manuelle Prüfung sowie automatisiert durch IT-Systeme erfolgen.

Tabelle 2: Modulschema zur Werkerassistenz nach POSTAWA (2014)

Modul	Inhalt
Planungsmodul	<ul style="list-style-type: none">▪ Bestimmung des Arbeitsplans▪ Bestimmung der Arbeitsobjekte und -mittel▪ Erstellung des Arbeitsplans
Ausführungsmodul	<ul style="list-style-type: none">▪ Bereitstellung des Arbeitsplans▪ Bereitstellung der Arbeitsobjekte und -mittel
Bewertungsmodul	<ul style="list-style-type: none">▪ Bewertung der Leistung▪ Bestimmung observierbarer und messbarer Leistung

POSTAWA (2014) zeigt acht Vorgehensschritte auf, die die Erstellung eines Assistenz- und Qualifikationssystems zum Ziel haben. Auf Basis einer Anforderungsliste sowie Grobkonzepten für Schlüsseltechnologien werden das Assistenz- und das Qualifikationssystem getrennt voneinander konzipiert und implementiert.

Hierbei wird u.a. auf E-Learning-Module gesetzt, um Arbeitsschritte im Detail zu beschreiben. Fokus der Arbeit ist die Qualifizierung von Monteuren mit geringen Fachkenntnissen. Dabei liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf der technischen Implementierung. Ein Prozess zur Einbindung der Mitarbeiter sowie eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden nicht eingesetzt.

3.5.3 Montageführende Werkerinformation nach LUŠIĆ ET AL. (2016)

LUŠIĆ ET AL. (2016) beschäftigen sich mit aktuellen Technologien von Werkerinformationssystemen sowie mit einer Auswahl unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer Randbedingungen. Neben der Bildschirmdarstellung stellt die Arbeit als neue Technologien Augmented Reality (AR), Augmented Virtuality (AV), Virtual Reality (VR) sowie lichtgeführte Werkerinformationssysteme vor. Zusätzlich wird auf intelligente Behälter, die sich IT-gesteuert öffnen und schließen (pick-by-shutter) und auf auditive Informationsbereitstellung (pick-by-voice) eingegangen.

Diesen Technologien werden acht Kriterien gegenübergestellt, um Restriktionen bei der Technologieauswahl zu identifizieren. Diese Kriterien umfassen:

- Mobilitätsanforderungen an das Assistenzsystem
- Statische und dynamische Bereitstellung von Informationen
- Adaptivität der Werkerführung
- Speicherort der Informationen
- Zeitpunkt der Informationsbereitstellung
- Zentrale und dezentrale Informationsbereitstellung
- Reale und virtuelle (z. B. mittels CAD) Informationsdarstellung
- Dialogfähigkeit des Assistenzsystems

In einer Domain-Mapping-Matrix (DMM) zeigen LUŠIĆ ET AL. (2016) bei welcher Ausprägung der acht Kriterien ein Ausschluss einzelner Technologien erfolgt. Liegt beispielsweise ein mobiler Arbeitsplatz vor, wird nach der Matrix eine lichtgeführte Informationsbereitstellung ausgeschlossen. Jedoch zeigt sich, dass zwei der acht dargestellten Kriterien keinen Einfluss auf die gezeigten Technologien haben. LUŠIĆ ET AL. (2016) stellen einen Prozess zur Auswahl von Technologien vor, der zahlreiche Fragestellungen beinhaltet, die bei der Technologieauswahl beantwortet werden müssen. Hierbei sollen die vorliegenden Eigenschaften von Werkerinformationssystemen analysiert und mit unternehmensspezifischen An-

forderungen abgeglichen werden. Auf den Bedarf einer Wirtschaftlichkeitsbewertung wird hingewiesen, jedoch kein Konzept für die Durchführung präsentiert. Im Rahmen seiner Dissertation widmete sich LUŠIĆ (2017) der Anweisungserstellung parallel zum Produktentstehungsprozess. Die Nutzung von CAD-Daten ist hierbei ein vielversprechender Ansatz zur Anweisungsgenerierung in der Betriebsphase eines Assistenzsystems nach dessen Einführung.

3.5.4 Reifegradmodelle für interaktive Assistenzsysteme nach WILLEKE & KASSELMANN (2016)

Im Rahmen des AiF-Projektes „4.0 Ready“ befassten sich WILLEKE & KASSELMANN (2016) mit der Entwicklung eines Reifegradmodells zur Steigerung der Industrie 4.0-Befähigung in der Produktion. Dieses Reifegradmodell wurde am Beispiel interaktiver Assistenzsysteme entwickelt. Mit einem Softwaredemonstrator können die Komponenten Datenhandschuh, Sensorarmband, Datenbrille, Unterarmcomputer, Datenuhr, Intelligente Kleidung sowie Headset mittels eines umfangreichen Fragebogens für den Einsatz im eigenen Unternehmen bewertet werden. Das Ergebnis wird als numerischer Reifegrad dargestellt, der aufzeigt, ob die jeweilige Interaktionskomponente des Assistenzsystems im Unternehmen eingesetzt werden kann.

Damit ist es möglich eine Bewertung ausgewählter Komponenten durchzuführen. Eine Berücksichtigung von Unterstützungsbedarf und Anforderungen und eine methodische Auswahl dieser Komponenten findet vorab nicht statt. Zudem erfolgt eine Fokussierung des Vorgehens auf technische Aspekte ohne detaillierte Betrachtung wirtschaftlicher Fragestellungen.

3.5.5 Informationsassistenz in der Montage nach AEHNELT (2017)

AEHNELT (2017) behandelt in seiner Arbeit die Entwicklung einer kognitiven Informationsassistenz für die Montage. Dabei geht er auf psychologische Aspekte bei der kognitiven Unterstützung, die Integration von technischen Komponenten zur Unterstützung sowie die Einflüsse auf die Qualität des Arbeitsprozesses ein. AEHNELT (2017) stellt hierbei sechs Aufgaben der kognitiven Informationsassistenz vor:

1. Bewusstmachen
2. Führen
3. Anleiten

4. Dokumentieren
5. Überprüfen
6. Vorbeugen

Diese Aufgaben werden den Teilprozessen der menschlichen Kognition (Wahrnehmen, Denken, Lernen, Speichern und Erinnern) zugeordnet. Hierfür werden eine digitale Handlungssteuerung sowie ein digitales mentales Modell für Assistenzsysteme entwickelt. Zur Implementierung des Assistenzsystems wurde die kognitive Architektur SOAR ausgewählt. Diese analysiert die Veränderungen aller vorliegenden Sensorinformationen und generiert auf Basis des digitalen mentalen Modells und vorliegender Produktionsregeln eine Empfehlung zur Unterstützung des Monteurs. Diese wird schließlich auf einem Display visualisiert.

Das entwickelte Assistenzsystem „Plant@Hand“ wurde an einem Demonstrator evaluiert. Die Bewertung fand auf Basis von fünf Kriterien statt. Hierbei wurden der Anteil von Informationsbeschaffungszeiten, Fehlerrate, Wirkungsgrad, subjektiver Komplexität sowie Zufriedenheit mit der Montageanleitung betrachtet. Die Ermittlung der Kriterien erfolgte mittels eines Vergleichs zweier Testgruppen, die einerseits klassische Montageanleitungen und andererseits das entwickelte Assistenzsystem nutzten. Die Auswertungen zeigen, dass nicht in jedem Fall eine Zeiteinsparung durch ein Assistenzsystem erzielt werden kann. Durch die zunehmende Informationsakzeptanz war aber ein positiver Effekt bzgl. Fehlerrate und Wirkungsgrad statistisch nachweisbar (AEHNELT 2017).

3.5.6 Methodische Assistenzsystemauswahl nach HOLD ET AL. (2017)

Zur methodischen Auswahl von Assistenzsystemen nutzen HOLD ET AL. (2016A, 2016B, 2016C) das MTM-System. Mittels MTM können Bewegungsabläufe strukturiert und diese um Normzeiten ergänzt werden. Dabei erfolgt eine Analyse jedes einzelnen Unterschlusses eines Arbeitsgangs mittels MTM, wobei aggregierte Komplexitätskennzahlen für einzelne Arbeitsgänge sowie einzelne Montagearbeitsplätze berechnet werden. Hierzu wird u. a. das Modell zur Berechnung der Arbeitsplatzkomplexität nach ZELTZER ET AL. (2013) genutzt. Im Anschluss werden nach der Methode des Quality Function Deployments (QFD) Anforderungen und Merkmale pro MTM-Prozessschritt festgelegt und daraus eine Hypothese für eine Senkung der Fehlerwahrscheinlichkeit generiert.

Auf Basis dieser Herangehensweise wurde ein Planungs- und Evaluationsprozess entwickelt, welcher aus den drei Schritten Bedarfsermittlung, Konfiguration und

Bestimmung von Produktivitätseffekten besteht (HOLD ET AL. 2017). Nach der Bedarfsermittlung im ersten Schritt erfolgt bei der Konfiguration des Assistenzsystems eine Auswahl möglicher technischer Komponenten, die u. a. auch Technologiereifegrade berücksichtigt. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung des technischen Restrisikos. Die Bewertung der Produktivitätseffekte soll eine Unterstützung bzgl. der Investitionsentscheidung bilden. Bisherige Veröffentlichungen (HOLD ET AL. (2016A, 2016B, 2016C, 2017) beschreiben jedoch nur einen Überblick über den Planungs- und Evaluationsprozess und stellen keine detaillierte Ausgestaltung der Methodenschritte dar. Eine Einbindung von Mitarbeitern in den Einführungsprozess ist im Planungsprozess nicht vorgesehen.

3.5.7 Assistenzsysteme in der Montage nach KLEINEBERG ET AL. (2017)

KLEINEBERG ET AL. (2017) stellen in einem Leitfaden einen sechsphasigen Einführungsprozess für Assistenzsysteme vor (Abbildung 13). Innerhalb jeder der sechs Phasen werden Gestaltungsaufgaben und Erfolgsfaktoren aufgezeigt, die als Checklisten dargestellt und jeweils um eine bereits existierende Methode ergänzt werden.

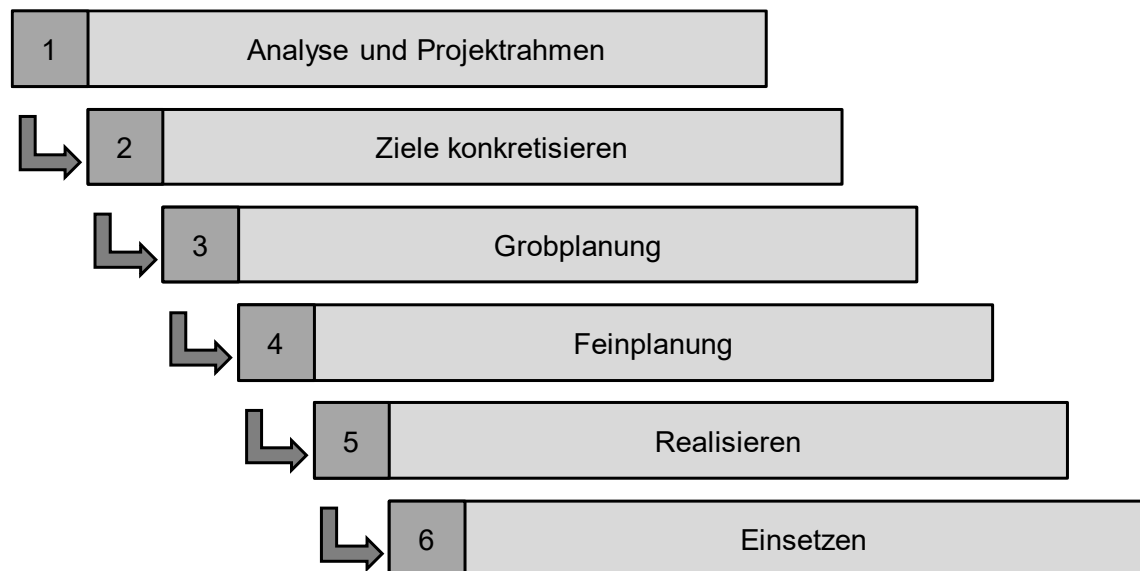


Abbildung 13: Sechsphasiger Einführungsprozess für Assistenzsysteme nach KLEINEBERG ET AL. (2017)

In der ersten Phase erfolgt eine Analyse der Ausgangssituation und die Definition des Projektrahmens. Als Methodenbeispiele werden eine Marktrecherche und eine Betriebsversammlung zur Kommunikation genannt. In der zweiten Phase werden

die Ziele und Anforderungen an das Assistenzsystem konkretisiert. Hier wird u.a. auf den menschenzentrierten Gestaltungsprozess und auf die SMART-Regel zur Zieldefinition verwiesen. Im Anschluss werden bei der Grobplanung erste Nutzer in den Gestaltungsprozess integriert und in der Feinplanung eine detaillierte Gestaltung von Hardware- und Software sowie eine Wirtschaftlichkeitsanalyse gefordert. Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird als Methode auf die Investitionsrechnung und die Amortisationsrechnung verwiesen. Realisierungs- und Einsatzphase beinhalten u.a. einen Testbetrieb und die Etablierung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses.

Dieser sechsphasige Prozess beschreibt die Einführung von Assistenzsystemen umfassend in Form einer Checkliste. Er verweist auf zahlreiche existierende Methoden, die in den einzelnen Phasen eingesetzt werden können. Eine detaillierte Ausgestaltung der einzelnen Methoden erfolgt jedoch nicht.

3.5.8 Individuelle Mitarbeiterbefähigung durch adaptive Assistenz nach BREITKOPF (2018)

BREITKOPF (2018) stellt eine Methodik zur individuellen Mitarbeiterbefähigung vor. Auf Basis von individuellen Kompetenzprofilen sowie definierten Assistenzprozessen soll eine adaptive Assistenz realisiert werden. Hierfür wird initial eine vierstufige Skalierung des Kompetenzniveaus eingeführt. Produktionsmitarbeiter werden in die Niveaus „Anfänger“, „Basis“, „Fortgeschritten“ sowie „Experte“ eingeteilt. Um den Erstellungs- und Pflegeaufwand für das Assistenzsystem zu reduzieren und unterstützende Schritte zu priorisieren, wird das Konzept der Assistenz-Relevanz-Analyse (ARA) eingeführt. In Anlehnung an die Risikoprioritätszahl der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) werden hierbei Auftrittshäufigkeit, Wissensverlustrisiko sowie Prozessbedeutsamkeit separat auf einer Skala von null bis zehn bewertet und anschließend miteinander multipliziert. Die daraus resultierende Prozessprioritätszahl (PPZ) empfiehlt, ob der Prozessschritt für das Assistenzsystem berücksichtigt werden soll. Zusätzlich wird eine Risikozahl berechnet, die mögliche Ausführungsfehler berücksichtigt. Zur Entwicklung des Assistenzsystems wird der PDCA-Zyklus genutzt (Plan-Do-Check-Act), um iterativ Assistenzprozesse zu verbessern. Eine darauffolgende Teilmethode zur adaptiven Assistenz soll den Mitarbeiter individuell unterstützen, um Aufgaben, bei denen keine Routine vorliegt, trotzdem effizient durchzuführen. Sofern notwendige Basisanforderungen erfüllt werden, erfolgt ein Assistenzprozess

durch eine Schritt-für-Schritt-Anleitung. Die Detaillierungsstufe des Assistenzsystems wird von einem Algorithmus auf Basis der Leistungsanforderungen des Prozesses und den Fähigkeiten des Mitarbeiters bestimmt. Der Mitarbeiter kann dabei selbst die vorgeschlagene Detaillierungsstufe bei Bedarf erhöhen oder absenken. Mitarbeiterprofile sind zusätzlich dynamisch gestaltet. Abhängig von der Entscheidung des Mitarbeiters, eine Detailansicht zu wählen und dem Erfolg oder Misserfolg des Prozesses, erfolgt eine regelbasierte Anpassung des Mitarbeiterprofils. Hierzu werden zusätzlich Lernprozesse abgebildet, die durch Wiederholung der Arbeitsaufgabe unterstützt werden. Daneben werden Vergessensprozesse abgebildet, in die der Zeitabstand zur letzten Durchführung einfließt.

Die Methodik nach BREITKOPF (2018) wurde für Anwendungsfälle im Produktionsumfeld konzipiert. Im Rahmen der Arbeit erfolgt eine Anwendung in der Instandhaltung einer automatisierten Montageanlage. Eine spezielle Berücksichtigung der manuellen Montage findet nicht statt. Mitarbeiter werden im Sinne des PDCA-Zyklus in die Gestaltung des Assistenzsystems eingebunden. Eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt nicht. Ähnlich wie in der Arbeit von POSTAWA (2014) ist das Ziel, Mitarbeiter während des Arbeitsprozesses zu qualifizieren.

3.5.9 Gegenüberstellung der Auswahlverfahren

Zahlreiche Arbeiten zu kognitiven Assistenzsystemen beschäftigen sich mit der Entwicklung eines spezifischen Assistenzsystems für einen vorgegebenen Anwendungsfall. Die Entwicklung einer Handlungsanleitung steht nur bei wenigen Arbeiten im Fokus der Forschungsarbeiten bzw. stellt nur ein Nebenprodukt dar.

Um bisherige Arbeiten zu vergleichen, die Ansätze für Auswahlverfahren für kognitive Assistenzsysteme beinhalten, wird eine Analyse mit ausgewählten Kriterien durchgeführt (Tabelle 3), die aus der Zielstellung der Arbeit abgeleitet worden sind.

Diese Analyse zeigt, dass sich zahlreiche Arbeiten schwerpunktmäßig mit der Informationsbereitstellung durch Assistenzsysteme beschäftigen. Die Unterstützung bei Qualitätssicherungsaufgaben (z. B. durch einen Eingriff bei einem Montagefehler) wird nur in wenigen Arbeiten (z. B. POSTAWA 2014) im Detail berücksichtigt. Auch die Nutzung von Assistenzsystemen für eine digitale Prozessdokumentation wird bei Auswahlverfahren nur am Rande betrachtet. Hierdurch bleibt das Integrationspotenzial von Arbeitsanweisungen und Prüfprotokollen ungenutzt.

3 Stand der Forschung und Technik

Gerade in der auftragsbezogenen Montage müssen beide Dokumente parallel auf den Auftrag angepasst und durch den jeweiligen Monteur genutzt werden. Digitale Systeme können dagegen eine Prozessunterstützung ermöglichen, die an den jeweiligen Prozessschritten Informationen zur Erklärung ausgeben, bzw. zur Dokumentation annehmen.

Tabelle 3: Gegenüberstellung bisheriger Arbeiten zur Nutzung von Assistenzsystemen im Produktionsumfeld

	LANG 2007	POSTAWA 2014	LUŠIĆ ET AL. 2016	WILLEKE & KASSELMANN 2016	AEHNELT 2017	HOLD ET AL. 2017	KLEINEBERG ET AL. 2017	BREITKOPF 2018
Informationsbereitstellung durch Assistenzsysteme	●	●	●	●	●	●	●	●
Übernahme von Qualitätssicherungsaufgaben durch Assistenzsysteme	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Dokumentation und Rückmeldung durch Assistenzsysteme	○	◐	○	○	◐	◐	○	◐
Detaillierte Betrachtung der manuellen Montage	○	◐	○	○	●	●	◐	○
Berücksichtigung von Technologiereifegraden	○	○	◐	●	○	●	○	○
Technologiefreie Bewertung von Anforderungen	○	○	◐	◐	◐	●	◐	○
Methodische Einbindung der Nutzer des Assistenzsystems	○	○	○	○	○	○	◐	◐
Umfassende Wirtschaftlichkeitsbewertung	○	○	○	○	◐	◐	◐	○

Legende:

- : Kriterium nicht erfüllt
- ◐: Kriterium teilweise erfüllt
- : Kriterium vollständig erfüllt

Zudem erfolgt lediglich in den Arbeiten von AEHNELT (2017) und HOLD ET AL. (2017) eine detaillierte Betrachtung der Anforderungen, die sich aus der manuellen Montage ergeben. Da sich die Montage durch ihre unternehmensspezifische Vari-

anz von Tätigkeiten in der Intralogistik und durch die Deterministik von Instandsetzungsarbeiten unterscheidet, sind für ein Assistenzsystem in der manuellen Montage die unternehmensspezifischen Ausprägungen zu betrachten.

Reifegrade werden nur in einzelnen Arbeiten betrachtet. Eine fehlende Betrachtung von Reifegraden birgt jedoch die Gefahr einer nicht ausreichenden Stabilität des Assistenzsystems.

Eine detaillierte Ausgestaltung einer umfänglichen methodischen Einbindung von Nutzern in den Auswahlprozess findet sich in keinem der dargestellten Ansätze.

Auch eine Wirtschaftlichkeitsbewertung wird entweder nur teilweise oder gar nicht durchgeführt.

3.6 Ableitung des Handlungsbedarfs

Im Rahmen der vorherigen Abschnitte wurden der relevante Stand der Forschung und Technik analysiert. Aus diesen Betrachtungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen und Handlungsbedarfe für diese Arbeit.

Es existieren zahlreiche Modelle zur Beschreibung und Modellierung von Komplexität in der Produktion. Diese umfassen Komplexitätstreiber in Unternehmen, Modelle zur Beschreibung der Produktkomplexität bis hin zu Modellen, die Gesamtkomplexitäten für einzelne Arbeitsplätze berechnen. Erfolgt für den Einsatz kognitiver Assistenzsysteme eine Bewertung der Komplexität, um daraus bedarfsgerecht Anforderungen an das Assistenzsystem zu erheben, müssen bisherige Modelle adaptiert werden. Hierbei ist die Betrachtung auf diejenigen Komplexitätstreiber einzuschränken, bei welchen kognitive Assistenzsysteme eine Unterstützung bieten können. Zudem wird eine Bewertung des gesamten Arbeitsplatzes benötigt, welche mit bedarfsgerechtem Aufwand in einer variantenreichen Produktion durchgeführt werden kann. Im Gegensatz zu anderen Anwendungsfällen der Komplexitätsbewertung muss hier ein Verfahren entwickelt werden, das mit begrenzten Analyseaufwänden die notwendigen Komplexitätsaspekte erfasst. Aufgrund der vielfältigen Unterstützungsmöglichkeiten ist die Aggregation aller Komplexitätstreiber auf einen einzelnen Kennwert nicht nötig und für die bedarfsgerechte Gestaltung von Assistenzsystemen sogar von Nachteil. Abhängig von den Unterstützungspotenzialen kognitiver Assistenzsysteme ist eine mehrdimensionale Beschreibung der Komplexität an einem Arbeitsplatz zu wählen, damit die jeweilig stark ausgeprägten Komplexitätstreiber gezielt durch Assistenzfunktionen

3 Stand der Forschung und Technik

unterstützt werden können. Die Aggregation aller Komplexitätstreiber auf eine singuläre Kennzahl könnte lediglich zur Auswahl derjenigen Arbeitsplätze mit dem höchsten Unterstützungsbedarf genutzt werden, nicht aber zur Gestaltung von Assistenzsystemen selbst.

In der Literatur existieren unterschiedliche Begriffe und Typologien zur Beschreibung von Assistenz. Aufgrund der aktuell zahlreichen und parallellaufenden Forschungstätigkeiten im Themenfeld der kognitiven Assistenzsysteme existiert kein einheitliches Verständnis der Unterstützungsarten kognitiver Assistenzsystemen. Bei der Beschreibung von Assistenzfunktionen soll daher eine Typologie genutzt werden, die bestehende Modelle aufgreift und bedarfsgerecht ergänzt.

Es ist eine Mitarbeiterpartizipation anzustreben, die eine sachgemäße Nutzung und eine aktive Akzeptanz fördern. Aufgrund der unternehmerischen Verantwortung einer Investitionsentscheidung ist bei der Einführung von Assistenzsystemen der Weg der Mitbestimmung zu hinterfragen. Es sollten aber Wege der Konsultation und Mitwirkung identifiziert werden, bei denen Mitarbeiter in den Einführungsprozess eingebunden werden. Bisherige Ansätze zur Bewertung von Technologieakzeptanz oder Gebrauchstauglichkeit setzen auf einen Nutzertest eines Systems, der im Anschluss mittels eines Fragebogens bewertet wird. Dies ist möglich, sofern bereits ein entwickeltes Gesamtsystem besteht. Ziel kann eine Bewertung des Systems bzw. ein Vergleich zwischen zwei Entwicklungsstadien sein. Sofern noch kein Gesamtsystem existiert, ist jedoch ein Nutzertest nicht möglich. Hierbei ist zu analysieren, welche Ansätze der Akzeptanzbewertung bereits in frühen Phasen der Entwicklung eines kognitiven Assistenzsystems genutzt werden können.

Der Vergleich bisheriger Ansätze von Auswahlverfahren kognitiver Assistenzsysteme zeigt, dass aktuell keine Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme existiert, die eine detaillierte Einbindung von Mitarbeitern und eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beinhaltet.

Bei den Funktionalitäten kognitiver Assistenzsysteme wird in der Literatur schwerpunktmäßig die Informationsbereitstellung thematisiert. Qualitätssicherung und digitale Dokumentation werden kaum betrachtet. Um die Potenziale von Assistenzsystemen hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität einfacher nutzbar zu machen, bedarf es daher einer neuen Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage.

4 Anforderungen an die Methode

Die in Kapitel 2 dargestellten Grundlagen veranschaulichen, dass gegenwärtig im Themenfeld der kognitiven Assistenzsysteme zahlreiche neue Technologien entstehen. Gleichzeitig ist die manuelle Montage von zahlreichen Komplexitätstreibern geprägt. In Kapitel 3 wurde anhand einer Analyse des aktuellen Stands der Forschung und Technik demonstriert, an welchen Stellen weiterer Forschungsbedarf besteht. Aus diesem Handlungsbedarf wurden, bezogen auf die Forschungsfragen, vier Anforderungen abgeleitet. Diese werden im Folgenden dargestellt. Sie dienen als Leitlinie für die Modell- und Methodenentwicklung sowie als Kriterien für die Validierung des Systems.

Bedarfsgerechte Komplexitätsbewertung der manuellen Montage

Aufgrund der vielfältigen Ausprägungsmöglichkeiten der manuellen Montage und unterschiedlicher unternehmensspezifischer Gegebenheiten muss eine Bewertung der Komplexität des zu unterstützenden Montagearbeitsplatzes erfolgen. Diese Bewertung muss mehrdimensional stattfinden, um die für das analysierte Montagesystem notwendigen Assistenzfunktionen zu spezifizieren. Das Bewertungsvorgehen muss alle relevanten Aspekte für diese Spezifikation enthalten, aber auch eine unnötige Detailtiefe vermeiden, um den Aufwand der Komplexitätsbewertung und den der Gesamtmethode handhabbar zu gestalten.

Technologiefreie Beschreibung von Assistenzfunktionen und Berücksichtigung alternativer Assistenzsystemkonzepte

Aufgrund der aktuellen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Themenfeld der kognitiven Assistenzsysteme soll eine methodische und technologiefreie Beschreibung von Assistenzfunktionen erfolgen. Es soll keine direkte Zuordnung von Unterstützungsbedarfen zu aktuell verfügbaren Technologien stattfinden, sondern als Zwischenebene eine abstrakte Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen genutzt werden. Diese abstrakte Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen ermöglicht unter Verwendung einer zu aktualisierenden Technologie- und Komponentendatenbank auch die Anwendung der Methode für zukünftige Technologien und Komponenten kognitiver Assistenzsysteme. Für diese Datenbank muss ein Beschreibungsmodell für kognitive Assistenzsysteme entwickelt werden, das den modellhaften Aufbau kognitiver Assistenzsysteme beschreibt und eine Bewertung des technologischen Reifegrades integriert. Aufgrund der großen technologischen Vielfalt und Unterstützungsmöglichkeiten, sollen zu Beginn des Einführungspro-

4 Anforderungen an die Methode

zesses alternative Assistenzsystemkonzepte mit unterschiedlichem Unterstützungsgrad berücksichtigt werden. Die Entscheidung für den Umfang der einzuführenden Technologien soll auf Basis einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen. Die Berücksichtigung alternativer Konzepte soll durch eine Möglichkeit zur Priorisierung der Assistenzfunktionen ermöglicht werden.

Einbindung von Nutzern in den Einführungsprozess

Mittels eines methodischen Vorgehens zur Einbindung von Nutzern in den Einführungsprozess des Assistenzsystems soll die Akzeptanz gesteigert werden. Dabei ist eine möglichst frühzeitige Einbindung zu bevorzugen, um den Akzeptanzeffekt durch die Mitgestaltung des Systems durch den Nutzer zu erhöhen. Zudem soll ein Weg aufgezeigt werden, wie Monteure nicht nur durch in der Wissenschaft verbreitete konzeptionelle Workshops, sondern auch durch praktische Anwendung von Assistenzsystemen in die Veränderung des Arbeitssystems eingebunden werden können. Durch eine vertiefte Einbindung ausgewählter Nutzer, soll „aktive Akzeptanz“ geschaffen werden, die durch Multiplikatoren innerhalb der Belegschaft verbreitet wird.

Umfassende Wirtschaftlichkeitsbewertung

Mehrere Publikationen zeigen, dass mit Assistenzsystemen die Produktivität erhöht und Fehler gesenkt werden können. Assistenzsysteme haben daher mehrere direkte Effekte, die abgeschätzt werden können und im Anschluss in eine konventionelle Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen. Neben diesen direkten Effekten ergeben sich durch Assistenzsysteme in der Produktion weitere Vorteile für das Unternehmen. Beispielsweise wird die Fähigkeit zur auftragsbezogenen Montage verbessert und das einsetzende Unternehmen kann dadurch Kundenbedarfe besser erfüllen. Zudem steigt die Innovationskraft des Unternehmens, was sich vorteilhaft auf weitere Digitalisierungsprojekte sowie auf die Innen- und Außendarstellung des Unternehmens auswirkt. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbewertung eingesetzt werden, die auch indirekte Einflüsse kognitiver Assistenzsysteme berücksichtigen.

5 Systemmodell für kognitive Assistenzsysteme

5.1 Übersicht

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines Systemmodells für kognitive Assistenzsysteme beschrieben. Ziel ist eine Modellierung des strukturellen Aufbaus von Assistenzsystemen, um eine bedarfsgerechte Komponentenauswahl im Einführungsprozess treffen zu können. Zu Beginn des Kapitels wird das Gesamtmodell dargestellt. Im darauffolgenden Abschnitt werden die einzelnen Systemelemente im Detail beschrieben.

5.2 Gesamtdarstellung des Systemmodells

Bei der Entwicklung des Systemmodells (Abbildung 14) wurden bestehende Definitionen kognitiver Assistenzsysteme analysiert. Diese werden mit Anforderungen an das Systemmodell für den Einführungsprozess kombiniert, welche mittels Workshops mit Industriepartnern aus der Montage und Experten für Assistenzsysteme erhoben wurden. Die Modellierung des Systemmodells wurde mittels der Unified Modeling Language (UML) realisiert.

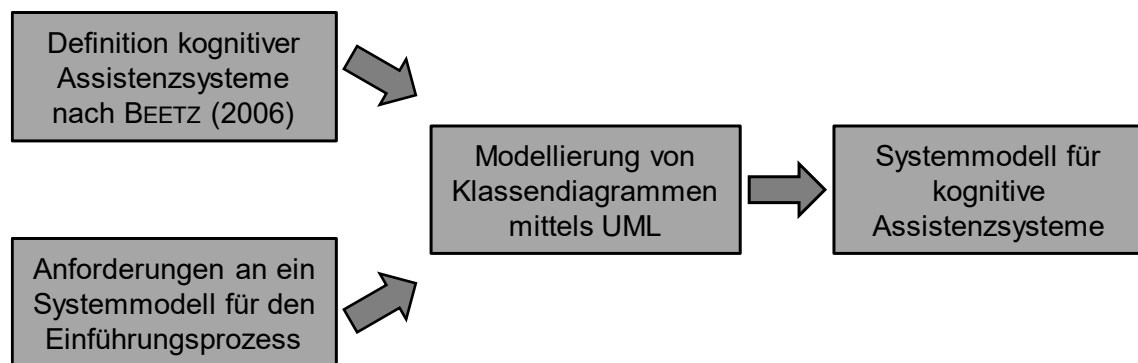


Abbildung 14: Vorgehen zur Entwicklung des Systemmodells

Von den in Abschnitt 2.3.1 dargestellten Definitionen für Assistenzsysteme wurde die Definition nach BEETZ (2006) als Basis für die eigene Definition sowie als oberste Strukturierungsebene zu Modellierung von Assistenzsystemen ausgewählt, da diese eine methodische Komponentenauswahl unterstützt. Ein Assistenzsystem soll daher als ein System modelliert werden, dessen Elemente Komponenten sind (Abbildung 15). Eine Komponente soll spezifische Hardware sein, die

5 Systemmodell für kognitive Assistenzsysteme

beschafft werden kann bzw. eine Softwarekomponente, die lizenziert bzw. programmiert wird. Umgangssprachlich werden oft einzelne Komponenten, z. B. ein Tablet, als Assistenzsystem bezeichnet. Nach dem entwickelten Systemmodell stellt dies jedoch kein Assistenzsystem dar, sondern es ist als eine von mehreren Hardware- und Softwarekomponenten anzusehen, die in ihrer Gesamtheit ein Assistenzsystem bilden, das am Montagearbeitsplatz unterstützt. Aus Workshops mit Verantwortlichen für Montagesysteme aus der Industrie sowie Experten für Assistenzsysteme ergaben sich u.a. folgende wesentliche Anforderungen an ein Systemmodell für kognitive Assistenzsysteme:

- Berücksichtigung von Kosten
- Berücksichtigung von Technologiereifegraden
- Möglichkeit zur technologiefreien Beschreibung der Fähigkeiten

Die erste Berücksichtigung von Kosten wird bereits in der Beschreibung von Assistenzsystemen durch Komponenten benötigt, indem im Datenmodell die Investitionskosten bzw. laufenden Kosten (Softwarelizenzen, Wartung etc.) berücksichtigt werden können. Zur Berücksichtigung der Technologiereifegrade und zur modularen Beschreibung von Komponenten werden diese zusätzlich durch ihre Technologien beschrieben (Abbildung 15). Eine Komponente kann eine oder mehrere Technologien enthalten. Eine Möglichkeit zur technologiefreien Beschreibung der Fähigkeiten von Assistenzsystemen wird durch eine vierte Modellierungsebene „Fähigkeiten“ realisiert. Technologien können eine oder mehrere Fähigkeiten ermöglichen. Eine Fähigkeit kann zudem von mehreren Technologien ermöglicht werden.

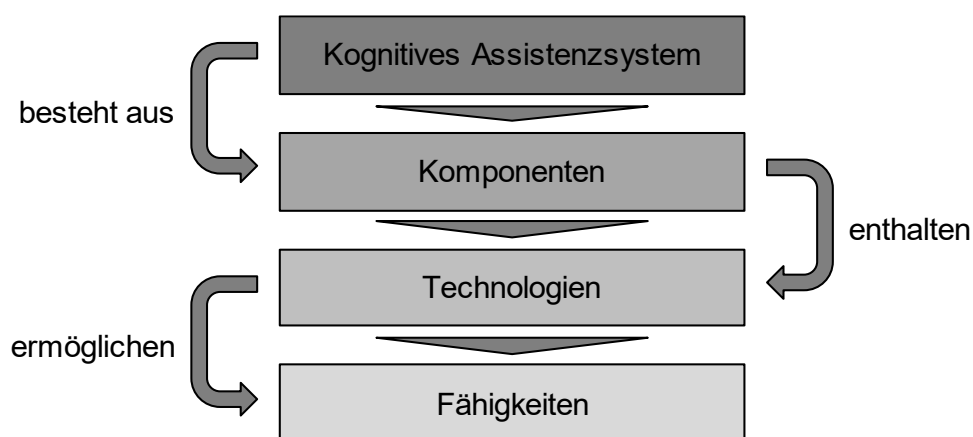


Abbildung 15 Hauptelemente des Systemmodells kognitiver Assistenzsysteme
(in Anlehnung an MERKEL ET AL. 2017A)

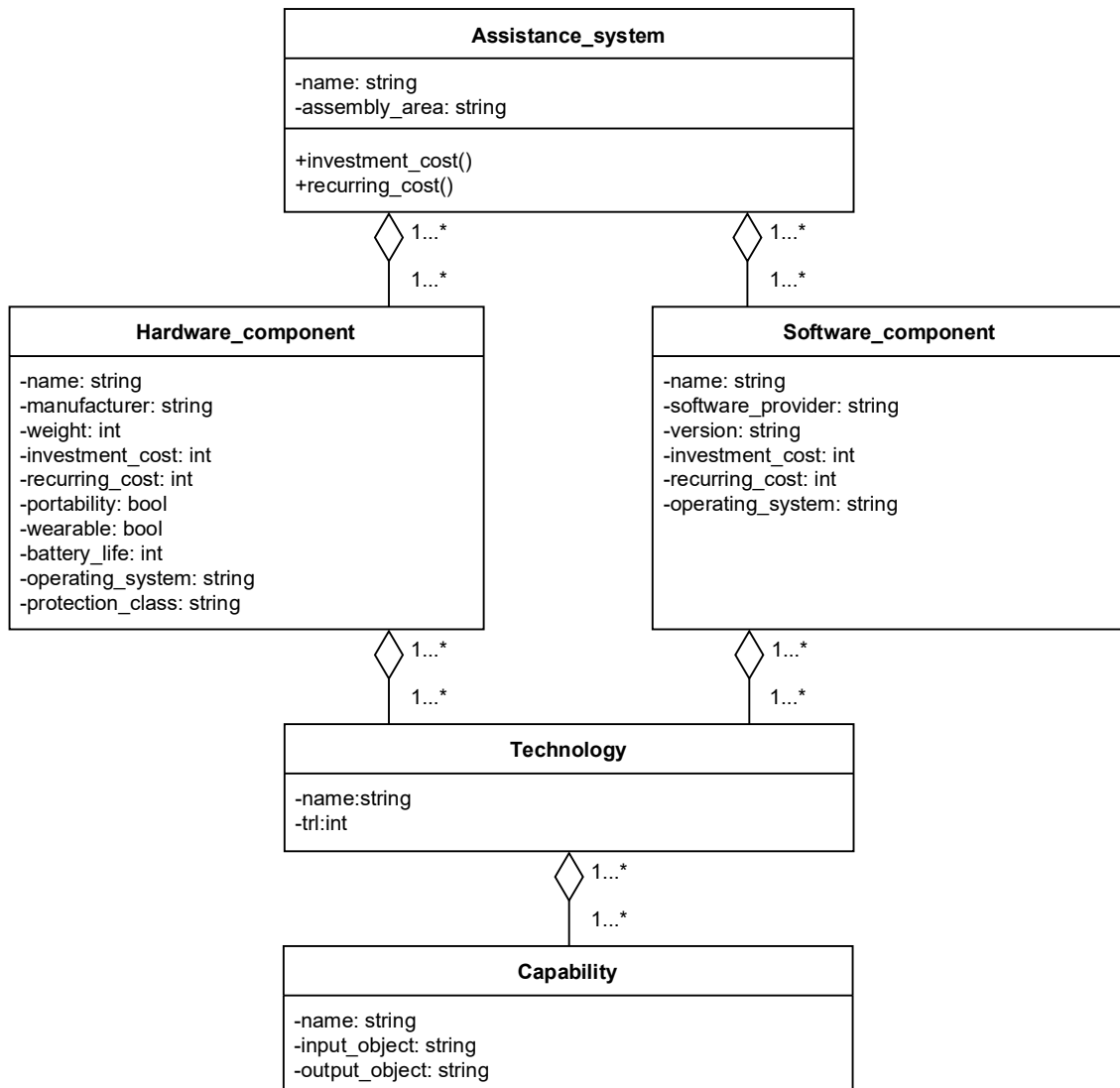


Abbildung 16: UML-Darstellung des Systemmodells
(in Anlehnung an MERKEL ET AL. 2017B, 2019A)

Bei der detaillierten Ausgestaltung des Modells (Abbildung 16) wurde die Sprache UML eingesetzt. UML-Diagramme sind bei der Entwicklung von Software das zentrale Entwurfs- und Kommunikationsmittel (VAN RANDEN ET AL. 2016). Das Systemmodell besteht dabei aus fünf verschiedenen Klassen. Die Ebene „Komponenten“ wurde dabei in die Kategorien Hardware- und Software unterteilt, da diese Ebenen jeweils unterschiedliche Attribute benötigen. Die Zusammenhänge zwischen den Ebenen wurden mittels Assoziationen und Multiplizitäten abgebildet (VAN RANDEN ET AL. 2016). Ein Assistenzsystem besteht aus mehreren Komponenten. Komponenten können in mehreren Assistenzsystemen genutzt werden. Da aus Komponenten ein Assistenzsystem gebildet wird, existieren diese auch ohne

Assistenzsystem. Daher wurde der Zusammenhang mittels Assoziation anstelle einer Komposition modelliert. Die Zusammenhänge zwischen Komponenten und Technologien sowie zwischen Technologien und Fähigkeiten wurden analog abgebildet.

5.3 Beschreibung der Systemelemente

5.3.1 Assistenzsystem

Mit der Klasse *Assistance_system* wird das Assistenzsystem als Ganzes beschrieben. Die Klasse enthält Attribute (Tabelle 4) zur Beschreibung der Einordnung des Systems, die benötigt werden, wenn mehrere Assistenzsysteme im Unternehmen eingesetzt werden. Die Methoden (Tabelle 5) dienen dazu, aus den verschiedenen Komponenten aggregierte Kosten zu berechnen, die einen Parameter in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung abbilden.

Tabelle 4: Attribute der Klasse «*Assistance_system*»

Attribut	Datentyp	Beschreibung
Name	string	Name des Assistenzsystems
assembly_area	string	Bezeichnung des Montagebereichs

Tabelle 5: Methoden der Klasse «*Assistance_system*»

Methode	Beschreibung
investment_cost()	Ermittelt Investitionskosten des Assistenzsystems auf Basis der eingesetzten Komponenten
recurring_cost()	Ermittelt laufende Kosten des Assistenzsystems auf Basis der eingesetzten Komponenten

5.3.2 Komponenten

Die Klassen *Hardware_component* sowie *Software_component* dienen zur Beschreibung der Komponenten des Assistenzsystems. Die Attribute der Klasse *Hardware_component* enthält dabei mehrere Attribute (Tabelle 6), die speziell für Hardwarekomponenten benötigt werden.

Tabelle 6: *Attribute der Klasse «Hardware_component»*

Attribut	Datentyp	Beschreibung
name	string	Name der Hardwarekomponente
manufacturer	string	Name des Herstellers
weight	integer	Gewicht in Gramm (g)
investment_cost: int	integer	Einmalige Kosten in EUR
recurring_cost: int	integer	Laufende Kosten in EUR
portability: bool	boolean	Mobilität der Komponente
wearable: bool	boolean	Tragbarkeit der Komponente am Körper
battery_life: int	integer	Batterielaufzeit in Minuten (min)
operating_system:	string	Betriebssystem
protection_class:	string	Schutzklasse (z. B. IP67)

Softwarespezifische Attribute (Tabelle 7) wurden in einer eigenen Klasse modelliert. Im Gegensatz zu Hardwarekomponenten werden hier eine geringere Anzahl physischer Attribute benötigt. Die Versionsnummer wurde als eigenes Attribut aufgenommen, um die Integration von weiteren Funktionen bei der Weiterentwicklung der Software besser überblicken zu können.

Tabelle 7: *Attribute der Klasse «Software_component»*

Attribut	Datentyp	Beschreibung
name	string	Name der Softwarekomponente
software_provider	string	Name des Softwareanbieters
version	string	Versionsnummer
investment_cost	integer	Einmalige Kosten in EUR
recurring_cost	integer	Laufende Kosten in EUR
operating_system	string	Betriebssystem

5.3.3 Technologien

Die Klasse Technology (Tabelle 8) dient der detaillierten Beschreibung von Komponenten und deren Verknüpfung mit ihren Fähigkeiten. Den Technologien wird hier ein Reifegrad zugeordnet.

Tabelle 8: *Attribute der Klasse «Technology»*

Attribut	Datentyp	Beschreibung
name	string	Name der Technologie
trl	integer	Technology Readiness Level (TRL) der Technologie

5.3.4 Fähigkeiten

Die Fähigkeiten des Assistenzsystems werden mittels der Klasse Capability (Tabelle 9) modelliert. Sie stellen eine technologieneutrale Beschreibung der Funktionalitäten des Assistenzsystems dar. Die Entwicklung eines Fähigkeitenmodells zur Beschreibung von Assistenzfunktionen mittels Fähigkeiten als Input- und Outputobjekten wird in Kapitel 6 veranschaulicht.

Tabelle 9: *Attribute der Klasse «Capability»*

Attribut	Datentyp	Beschreibung
name	string	Name der Fähigkeit
input_object	string	Bezeichnung des Inputobjekts
output_object	string	Bezeichnung des Outputobjekts

5.4 Fazit

Das entwickelte Systemmodell ermöglicht die strukturelle Abbildung von Assistenzsystemen durch ihre einzelnen Elemente. Das Modell kann verwendet werden, um existierende Assistenzsysteme detailliert zu beschreiben, indem es top-down genutzt wird. Im Rahmen dieser Arbeit soll das Systemmodell jedoch bottom-up genutzt werden. Auf Basis der benötigten Fähigkeiten sollen die erforderlichen Technologien und Komponenten methodisch abgeleitet werden, um eine bedarfsgerechte Konfiguration des Assistenzsystems zu ermöglichen. Das Systemmodell schafft hierfür die notwendige Modellierung für den Aufbau einer Komponenten- und Technologiedatenbank. Auf die Beschreibung von Fähigkeiten und Assistenzfunktionen wird im folgenden Kapitel detailliert eingegangen.

6 Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen

6.1 Übersicht

In diesem Kapitel wird ein Modell zur Beschreibung der Informationsflüsse kognitiver Assistenzfunktionen vorgestellt. Es werden das Gesamtmodell und anschließend die einzelnen Systemelemente beschrieben sowie sechs Grundtypen von Assistenzfunktionen definiert. Eine detaillierte Beschreibung möglicher Assistenzfunktionen wird durch das im Anschluss dargestellte Fähigkeitenmodell realisiert. Eine Assistenzfunktion soll dabei wie folgt definiert werden:

Eine Assistenzfunktion beschreibt technologieneutral die zu einer spezifischen Mitarbeiterunterstützung zu realisierenden ein- und ausgehenden Informationsflüsse eines kognitiven Assistenzsystems.

6.2 Gesamtdarstellung des Informationsflussmodells

Zur Entwicklung der Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen wurden etablierte und zukünftige Technologien analysiert (vgl. Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3) und mit dem entwickelten Systemmodell (vgl. Kapitel 5) verknüpft.

Die Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen umfasst sowohl die Definition von Grundtypen als auch die Ableitung von Fähigkeiten zur detaillierten Beschreibung von Assistenzfunktionen (Abbildung 17).

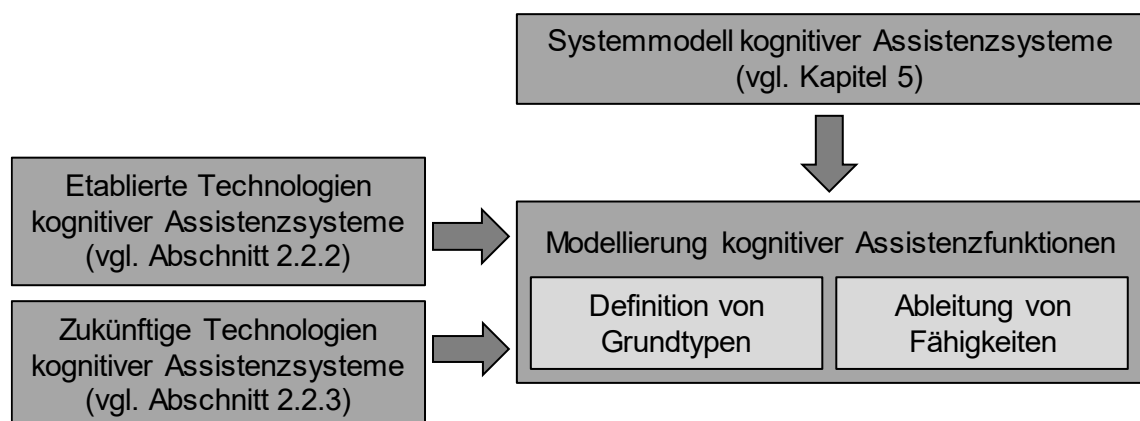


Abbildung 17: Vorgehen zur Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen

6 Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen

Die Analyse etablierter und zukünftiger Technologien zeigt, dass ein Assistenzsystem Informationen mit mehreren Objekten austauschen kann. Diese umfassen den unterstützenden Monteur, vorhandene IT-Systeme sowie den Arbeitsplatz, an dem das Produkt montiert wird (MERKEL ET AL. 2017B, 2018A). Während bei etablierten Assistenzsystemen durch die Anzeige von Arbeitsanweisungen ein unidirektionaler Informationsfluss zum Monteur erfolgt, werden in neueren Systemen auch Prüfprotokolle digitalisiert und somit ein bidirektionaler Informationsfluss eingesetzt. Durch die Verknüpfung mit auftragsführenden Systemen (z. B. ERP) erfolgt ebenfalls ein bidirektionaler Informationsfluss, bei welchem Auftragsinformationen abgerufen (Stammdaten) und Informationen zum Arbeitsfortschritt oder Prüfinformationen (Bewegungsdaten) gesendet werden können. Auch mit dem jeweiligen Montagearbeitsplatz können Informationen ausgetauscht werden, bspw. durch das Beschreiben eines intelligenten Produkts oder die Überwachung des Produkts im Rahmen der Qualitätssicherung.

Auf Basis der unterschiedlichen Informationsflüsse wurde eine umfassende Darstellung entwickelt, die den Informationsfluss zwischen kognitivem Assistenzsystem mit Montagemitarbeiter, IT-Systemen sowie Montagearbeitsplatz veranschaulicht (Abbildung 18). Die Elemente des Informationsflussmodells werden im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

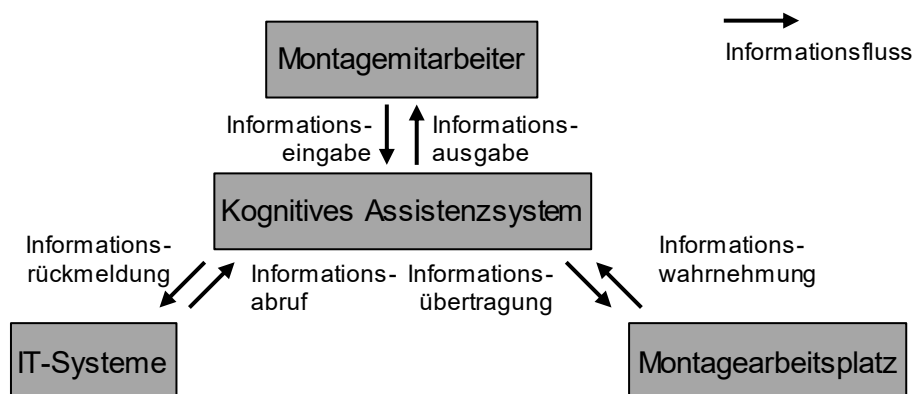


Abbildung 18: Informationsflüsse für kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage (in Anlehnung an MERKEL ET AL. 2017B, 2018A, 2019A)

6.3 Beschreibung der Systemelemente

6.3.1 Kognitives Assistenzsystem

Das kognitive Assistenzsystem stellt den zentralen Punkt im Modell dar. Es besteht gemäß der Definition von Abschnitt 2.3.1 und dem Systemmodell in Kapitel 5 aus der Menge aller für die Assistenz benötigten Komponenten. Zur Beschreibung der Informationsflüsse wird das Assistenzsystem als „Black Box“ modelliert. Die Informationsflüsse innerhalb des Assistenzsystems sind hierbei nicht abgebildet, da das Informationsflussmodell genutzt werden soll, um überhaupt die Funktionalitäten des Assistenzsystems zu ermitteln. Erst im Anschluss soll die Ausgestaltung des Assistenzsystems nach den ermittelten Bedarfen erfolgen.

6.3.2 Montagemitarbeiter

Die Informationsflüsse zwischen Montagemitarbeiter und kognitivem Assistenzsystem umfassen die manuelle *Informationseingabe* sowie *-ausgabe*. Bei der *Informationseingabe* werden Informationen vom Montagemitarbeiter aktiv an das Assistenzsystem weitergegeben. Dies kann bspw. durch eine Eingabe von Prüfinformationen oder das Bestätigen von Prozessschritten erfolgen. Bei der *Informationsausgabe* erhält der Montagemitarbeiter Informationen des Assistenzsystems, bspw. auftragspezifische Informationen.

6.3.3 IT-Systeme

Unter dem Begriff IT-Systeme werden alle dem Assistenzsystem übergeordneten IT-Systeme eines Unternehmens (z. B. ERP, MES, PPS) zusammengefasst, die Informationen mit dem Assistenzsystem austauschen. Diese können bspw. Produktionsaufträge aus Systemen der Produktionsplanung (SEITZ ET AL. 2018) umfassen. Softwarekomponenten des Assistenzsystems (z. B. Werkerführung) sind ein Teil des Objekts kognitives Assistenzsystem. Die Informationsflüsse zwischen IT-Systemen und kognitivem Assistenzsystem umfassen den *Informationsabruf* und die *Informationsrückmeldung*. Beim *Informationsabruf* werden Informationen und Merkmale zum Auftrag empfangen, der vorab bspw. durch eine Eingabe oder eine AutoID-Technologie identifiziert wurde. Bei der *Informationsrückmeldung* werden Informationen an übergeordnete IT-Systeme übertragen. Dies kann die Fertigstellung des Auftrags umfassen oder Daten, die eine Rückverfolgung des Produkts ermöglichen sollen.

6.3.4 Montagearbeitsplatz

Der Montagearbeitsplatz umfasst das Montageobjekt sowie intelligente mechanische Werkzeuge des Montagearbeitsplatzes. Rein mechanische Werkzeuge (z. B. Schraubenschlüssel) unterstützen den Werker physisch und sind daher keine Hardwarekomponenten des kognitiven Assistenzsystems. Der Informationsfluss zwischen Montagearbeitsplatz und kognitivem Assistenzsystem beinhaltet die *Informationsübertragung* und die *Informationsaufnahme*. Bei der *Informationsübertragung* werden Daten zum Montagearbeitsplatz übertragen, bspw. um Informationen auf den Datenspeicher eines intelligenten Produktes zu schreiben. Bei der *Informationsaufnahme* werden Werkzeug- oder Produktdaten vom Assistenzsystem aufgenommen, bspw. durch den Scan einer Auftragsnummer auf einem Produkt oder der Seriennummer einer zu montierenden Komponente.

6.3.5 Ableitung von Grundtypen

Die sechs elementaren Informationsflüsse beginnen oder enden jeweils im Assistenzsystem und tauschen Informationen mit den Objekten Montagemitarbeiter, IT-Systeme und Montagearbeitsplatz aus (Abbildung 19).

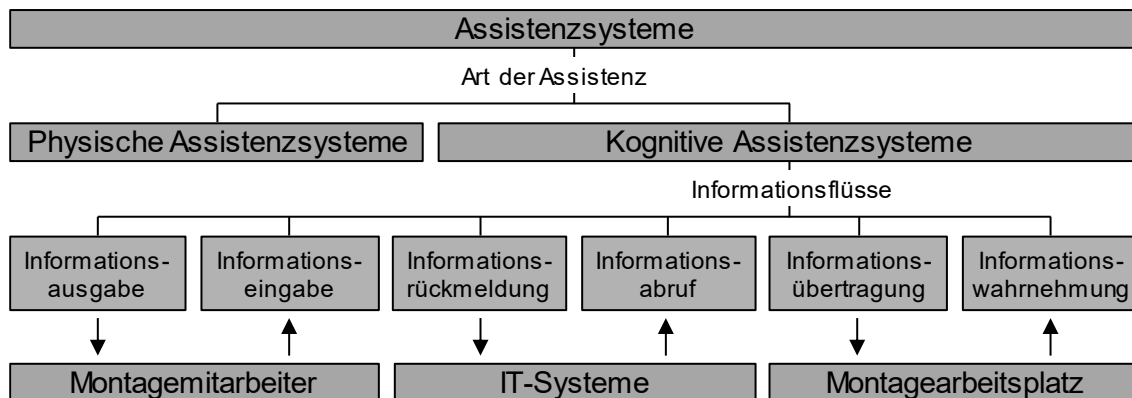


Abbildung 19: Einordnung der sechs elementaren Informationsflüsse

Das Assistenzsystem kann jedoch keine Quelle oder Senke von Informationen sein, da es selbst keine Informationen erzeugt und nicht der Datenspeicherung dienen soll, sondern übergeordnete Systeme. Es sind daher immer mehrere Informationsflüsse notwendig, die zusammen eine Assistenzfunktion bereitstellen. Um eine bedarfsgerechte Auswahl von Assistenzfunktionen zu ermöglichen, sollen Grundtypen von Assistenzfunktionen abgeleitet werden, die elementare Teilfunk-

6.4 Grundtypen kognitiver Assistenzfunktionen

tionen eines Assistenzsystems beschreiben. Diese Grundtypen sollen so beschrieben sein, dass sie auch als einzelne individuelle Assistenzfunktion umsetzbar wären. Außerdem sollen sie nicht in mehrere Assistenzfunktionen unterteilt werden können. Diese beiden Kriterien werden erfüllt, wenn für eine Assistenzfunktion je ein eingehender sowie ein ausgehender Informationsfluss, bezogen auf das Assistenzsystem, verwendet wird. Kombinatorisch ergeben sich sechs Paare an eingehenden und ausgehenden Informationsflüssen (Tabelle 10). Diese sechs Grundtypen werden im folgenden Abschnitt im Detail vorgestellt.

Tabelle 10: Grundtypen kognitiver Assistenzfunktionen

Bezeichnung des Grundtyps	Eingehender Informationsfluss	Ausgehender Informationsfluss
Werkerinformation	Informationsabruf	Informationsausgabe
Manuelle Dokumentation	Informationseingabe	Informationsrückmeldung
Produktaktualisierung	Informationsabruf	Informationsübertragung
Automatisierte Dokumentation	Informationswahrnehmung	Informationsrückmeldung
Qualitätssicherung	Informationswahrnehmung	Informationsausgabe
Manuelle Produktbeschreibung	Informationseingabe	Informationsübertragung

6.4 Grundtypen kognitiver Assistenzfunktionen

6.4.1 Werkerinformation

Die *Werkerinformation* kombiniert die Informationsflüsse *Informationsabruf* und *Informationsausgabe*. Informationen aus bestehenden IT-Systemen werden durch das Assistenzsystem an den Montagemitarbeiter übertragen. Eine *Werkerinformation* kann genutzt werden, um in der variantenreichen Produktion dem Montagemitarbeiter auftragsspezifische Informationen bereitzustellen. Sie kann auch verwendet werden, um eine Arbeitsanweisung für die Montage bereitzustellen, bspw. bei neuen Produkten oder neuen Mitarbeitern. Die *Werkerinformation* bildet bei zahlreichen Umsetzungen kognitiver Assistenzsysteme einen zentralen Baustein. Teilweise wird in der Literatur (DOMBROWSKI ET AL. 2010, FISCHER ET AL. 2014) von Werkerinformationssystemen gesprochen.

6.4.2 Manuelle Dokumentation

Die *manuelle Dokumentation* kombiniert die Informationsflüsse *manuelle Eingabe* und *Informationsrückmeldung*. Informationen werden vom Montagemitarbeiter durch das Assistenzsystem an übergeordnete IT-Systeme übertragen. Eine *manuelle Dokumentation* kann für die digitale Erfassung von Prüfergebnissen genutzt werden. Sie erfolgt durch den Montagearbeiter mit der Bestätigung durchgeführter Aktionen oder der Eingabe von Werten. Diese Informationen müssen an übergeordnete IT-Systeme rückgemeldet werden, um die Rückverfolgbarkeit des Produkts, bspw. mittels einer Seriennummer, zu ermöglichen. Die *manuelle Dokumentation* ersetzt so papiergebundene Prüfprotokolle und kann dafür, je nach unternehmensspezifischen und regulatorischen Anforderungen, auch eine digitale Unterschrift bzw. qualifizierte elektronische Signatur erfordern.

6.4.3 Produktaktualisierung

Die *Produktaktualisierung* kombiniert die Informationsflüsse *Identifikation* und *Informationsrückmeldung*. Informationen werden von übergeordneten IT-Systemen durch das Assistenzsystem an den Montagearbeitsplatz übertragen. Diese können auftragsspezifische Informationen umfassen, die auf einem intelligenten Produkt gespeichert werden. Sofern Informationen an Werkzeuge des Montagearbeitsplatzes übertragen werden, kann dies bspw. Informationen zu Drehmomenten für einen Drehmomentschrauber oder Fettmengen für eine Dosiereinheit enthalten. Beim Grundtyp *Produktaktualisierung* ist der Montagemitarbeiter nicht in den Informationsfluss eingebunden. Aufgrund der Definition kognitiver Assistenzsysteme, die eine Unterstützung und keinen Ersatz von Montagemitarbeitern beschreibt, kann dieser Grundtyp nur in Kombination mit anderen Grundtypen, die den Mitarbeiter einbinden, genutzt werden. Existieren nur Funktionalitäten, die keine Einbindung des Mitarbeiters benötigen, so handelt es sich um ein automatisiertes System und nicht um ein Assistenzsystem.

6.4.4 Automatisierte Dokumentation

Die *automatisierte Dokumentation* kombiniert die Informationsflüsse *Informationsabruf* und *Produktbeschreibung*. Informationen werden vom Montagearbeitsplatz durch das Assistenzsystem an übergeordnete IT-Systeme übertragen. Bei der *automatisierten Dokumentation* werden im Gegensatz zur *manuellen Dokumentation*

tion keine händischen Eingaben durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist ein Kamerasystem, das den Zustand während des Montageprozesses aufnimmt und zum jeweiligen Auftrag oder Produkt speichert. Die automatisierte Speicherung von Messergebnissen einer Prüfeinrichtung fällt auch in die *automatisierte Dokumentation*. Dieser vom Mitarbeiter unabhängige Grundtyp kann ebenfalls nur in Kombination mit einem der vier anderen Grundtypen innerhalb eines Assistenzsystems angewandt werden.

6.4.5 Qualitätssicherung

Die *Qualitätssicherung* kombiniert die Informationsflüsse *Identifikation* und *Werkerinformation*. Informationen werden vom Montagearbeitsplatz durch das Assistenzsystem an den Montagemitarbeiter übertragen. Bei der *Qualitätssicherung* kommt es nur zu einer Informationsausgabe, wenn ein Fehler am Montagearbeitsplatz identifiziert worden ist. Dies kann durch Sensorik (Kamera, Lichtschranke, etc.) am Montagearbeitsplatz erfolgen. Im Gegensatz zur *Werkerinformation* ist die *Qualitätssicherung* eine Assistenzfunktion, die bei gegebener Prozesssicherheit auch bei erfahrenen Montagemitarbeitern eingesetzt werden kann und nicht die Gefahr einer Unterforderung birgt. Ein Eingriff erfolgt erst im Fehlerfall, z. B. wenn bei der Montage ein Teil vergessen worden ist.

6.4.6 Manuelle Produktbeschreibung

Die *manuelle Produktbeschreibung* kombiniert die Informationsflüsse *manuelle Eingabe* und *Produktbeschreibung*. Informationen werden vom Montagemitarbeiter durch das Assistenzsystem an den Montagearbeitsplatz übertragen.

Die bei der *manuellen Produktbeschreibung* übertragenen Informationen können bspw. Fehlerinformationen in der Taktmontage enthalten. Ein Produkt kann als fehlerhaft gekennzeichnet werden und am Ende der Linie auf einen Nacharbeitsarbeitsplatz ausgeschleust werden. Im Vergleich zu den anderen Grundtypen stellt die *manuelle Produktbeschreibung* einen Grundtyp dar, der für eine geringere Anzahl an Anwendungsfällen benötigt wird.

6.5 Abgeleitete Fähigkeiten

6.5.1 Vorgehen zur Fähigkeitendefinition

Auf Basis der Grundtypen kann die grundsätzliche Art der Unterstützung eines Assistenzsystems konzipiert werden. Ein Grundtyp beschreibt jedoch eine Assistenzfunktion nicht ausreichend, um Hard- und Softwarekomponenten auswählen zu können. Um diese Auswahl zu ermöglichen, erfolgt eine Verknüpfung des Informationsflussmodells (Abschnitt 6.2) mit dem Systemmodell kognitiver Assistenzsysteme (Kapitel 5).

Sind den Informationsflüssen Fähigkeiten zugeordnet, so können beide Modelle in Kombination für eine methodische und bedarfsgerechte Konzeptionierung des Assistenzsystems genutzt werden.

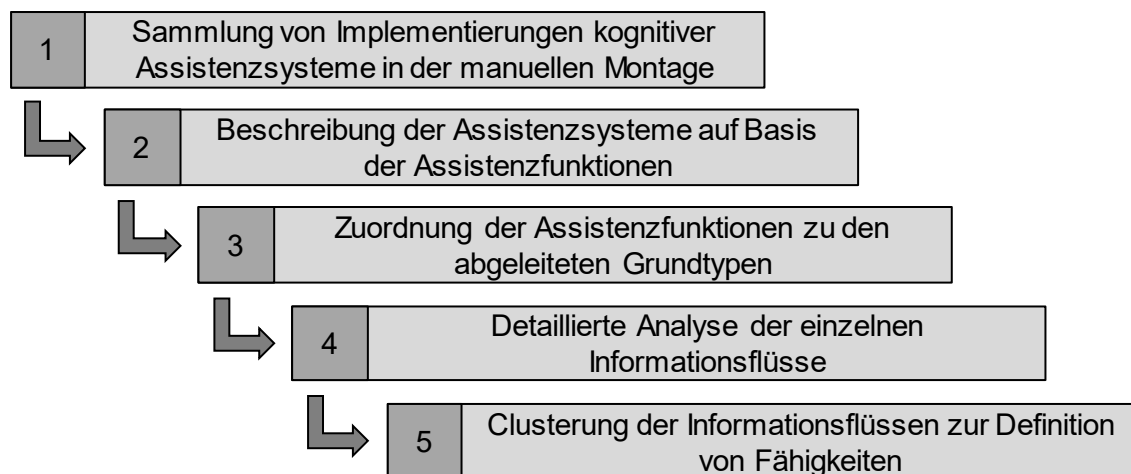


Abbildung 20: Angewandtes Vorgehen zur Definition von Fähigkeiten

Die ausgewählten Grundtypen können anschließend durch ihre Fähigkeiten detaillierter beschrieben und daraus die Technologien und Komponenten des Assistenzsystems abgeleitet werden. Im Rahmen dieses Abschnitts wird das Vorgehen zur Definition dieser benötigten Fähigkeiten (Abbildung 20) präsentiert.

Der erste Schritt für die Definition von Fähigkeiten umfasst eine Sammlung von 13 Implementierungen kognitiver Assistenzsysteme (Tabelle 11).

Im zweiten Schritt wurden die Assistenzsysteme in mehrere Assistenzfunktionen aufgeteilt, die einzelne Formen der Unterstützung präsentieren.

Im dritten Schritt wurden diese den Grundtypen aus Abschnitt 6.4 zugeordnet. Die Implementierungen umfassen vielfältige Formen der Unterstützung und decken alle Grundtypen ab.

Als Viertes erfolgte eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Informationsflüsse. Innerhalb der analysierten Umsetzungen wurden 65 Informationsflüsse innerhalb der sechs Kategorien identifiziert (Tabelle 11).

Im fünften Schritt wurden innerhalb der sechs Informationsflussrichtungen über alle Umsetzungen hinweg ähnliche Informationsflüsse in Clustern geordnet (MERKEL ET AL. 2019A). Hierbei ergaben sich 19 Cluster. Die Benennung dieser Cluster ergibt die benötigten Fähigkeiten.

Tabelle 11: Anzahl der identifizierten Informationsflüsse

		Informationsflüsse					
		Informationsausgabe	Informationseingabe	Informationsrückmeldung	Informationsabruf	Informationsübertragung	Informationsaufnahme
Umsetzungen kognitiver Assistenzsysteme	AEHNELT & BADER 2015	2	0	2	2	0	1
	BÄCHLER ET AL. 2015	1	1	1	0	0	1
	BANNAT 2014	1	0	1	1	0	1
	BLÜMLING & REITHINGER 2015	1	2	1	1	0	0
	BÜTTNER ET AL. 2014	1	0	2	1	1	1
	CIPRINA ET AL. 2018	1	1	1	1	0	0
	FRANKE & RISCH 2009	1	2	3	1	0	1
	KERBER & LESSEL 2015	2	2	1	1	0	1
	MÜLLER ET AL. 2014	2	2	1	1	1	2
	RODRIGUEZ ET AL. 2015	1	1	1	1	0	1
	SAGGIOMO ET AL. 2015	1	0	0	1	1	1
	STORK & SCHUBÖ 2010	1	1	1	1	0	0
	WÖLFLE 2014	2	2	2	1	0	1

6.5.2 Informationsflüsse mit Montagemitarbeiter

Für den Informationsfluss der Informationsausgabe konnten die Fähigkeiten #1 bis #3 identifiziert werden, bei der Informationsausgabe die Fähigkeiten #4 bis #7.

- *Warnung (#1)*
Um den Montagemitarbeiter bei einem Montagefehler oder einer Gefahr zu warnen, kann das Assistenzsystem mit der Fähigkeit der Warnung ausgestattet sein. Eine Warnung kann multimodal (visuell, akustisch, haptisch) erfolgen und besitzt von allen drei Fähigkeiten der Informationsausgabe die geringste Informationsmenge.
- *Bereitstellung auftragsspezifischer Informationen (#2)*
Eine Bereitstellung auftragsspezifischer Informationen ist in der variantenreichen Montage für alle Qualifikationsgrade notwendig, um dem Montagemitarbeiter die jeweilige Auftragskonfiguration mitzuteilen. Technisch kann dies multimodal (visuell, akustisch, haptisch) erfolgen, beispielsweise durch ein Pick-by-Light System (MÜLLER ET AL. 2014) oder durch einen Hinweis auf eine korrekte Umsetzung mittels akustischer Töne (WÖLFLE 2014).
- *Detaillierte Beschreibung des Montagevorgangs (#3)*
Eine detaillierte Beschreibung der durchzuführenden Tätigkeiten ist gerade für neue Montagemitarbeiter oder bei neuen Produkten eine wichtige Form der Assistenz. Dies kann auf einem Bildschirm (KERBER & LESSEL 2015) oder durch Projektionen erfolgen (AEHNELT & BADER 2014). Zur detaillierten Beschreibung des Montagevorgangs wird eine vollumfängliche Visualisierungstechnologie benötigt.
- *Binäre Eingabe (#4)*
Bei der binären Eingabe werden durchgeführte Tätigkeiten bestätigt. Dies kann durch einen Drückknopf (WÖLFLE 2014), einer Gestensteuerung (RODRIGUEZ ET AL. 2015) oder einem Touchscreen erfolgen. Hierzu wird lediglich ein binäres Eingabesignal benötigt.
- *Textuelle Eingabe (#5)*
Bei der textuellen Eingabe können manuell Fehlerinformationen oder eine Auftragsnummer eingegeben werden. Hierfür können spezifische Eingabegeräte genutzt werden (WÖLFLE 2014) oder ein Touchscreen mit Bildschirmtastatur.
- *Mitarbeiteridentifikation (#6)*
Bei der Mitarbeiteridentifikation kann sich der Montagemitarbeiter einloggen, um bspw. den Arbeitsplatz individuell anzupassen (MÜLLER ET AL. 2014). Hierfür können unterschiedliche Login-Technologien genutzt werden, bspw. über die jeweilige Mitarbeiterkarte.

- *Stressanalyse (#7)*

Die Stressanalyse kann genutzt werden, um eine Überbeanspruchung des Monteurs zu erkennen. Diese umfangreiche Informationseingabe kann beispielsweise durch eine Auswertung der Augenbewegung erfolgen (STORK & SCHUBÖ 2010).

6.5.3 Informationsflüsse mit IT-Systemen

Für den Informationsfluss der Informationsrückmeldung konnten die Fähigkeiten #8 bis #10 identifiziert werden, beim Informationsabruf die Fähigkeiten #11 und #12.

- *Anfrage auftragsspezifischer Informationen (#8)*

Ein Assistenzsystem hat die Möglichkeit, durch eine IT-Anbindung an höhere Systeme, den durchzuführenden bzw. den nächsten durchzuführenden Auftrag anzufordern (FRANKE & RISCH 2009). Hierfür wird bspw. eine Auftrags- oder Artikelnummer benötigt.

- *Auftragsspezifische Dokumentation (#9)*

Werden nach Abschluss der Montage Entnahmetätigkeiten (WÖLFLE 2014) oder Auftragsinformationen (FRANKE & RISCH 2009) dokumentiert, so erfolgt ebenfalls ein Informationsfluss vom Assistenzsystem an übergeordnete IT-Systeme.

- *Statusübermittlung (#10)*

Wird der Status des Montagearbeitsplatzes, bspw. für einen digitalen Zwilling an übergeordnete Systeme übertragen (CIPRINA ET AL. 2018), so erfolgt gleichfalls ein Informationsfluss. Diese Statusübermittlung kann den aktuellen Wert aller Sensorinformationen am Arbeitsplatz enthalten.

- *Übermittlung auftragsspezifischer Informationen (#11)*

Auf Basis von Aufträgen können dem Assistenzsystem von übergeordneten IT-Systemen Informationen wie Varianteninformationen (AEHNELT & BADER 2014) übermittelt werden. Diese können durch das Assistenzsystem aufbereitet werden, um eine Visualisierung für den Mitarbeiter zu erstellen.

- *Übermittlung von Prozessparametern (#12)*

Werden bspw. intelligente Werkzeuge am Arbeitsplatz eingesetzt, können die dafür benötigten Prozessparameter ebenfalls an das Assistenzsystem übertragen werden. Durch die Prozessparameter kann zudem eine Einstellung des Arbeitsplatzes (MÜLLER ET AL. 2014) erfolgen.

6.5.4 Informationsflüsse mit Montagearbeitsplatz

Für den Informationsfluss der Informationsübertragung konnten die Fähigkeiten #13 und #14 identifiziert werden, bei der Informationsaufnahme die Fähigkeiten #14 bis #18.

- *Beschreibung intelligenter Produkte (#13)*
Eine Beschreibung von Produkten kann beispielsweise durch einen RFID-Transponder (SAGGIOMO ET AL. 2015) erfolgen.
- *Übertragung von Prozessparametern (#14)*
Zur Einstellung des Arbeitsplatzes können Prozessparameter vom Assistenzsystem übertragen werden (MÜLLER ET AL. 2014).
- *Produktidentifikation (#15)*
Zur Identifikation eines Produkts können unterschiedliche AutoID-Technologien (z. B. Barcode) zum Einsatz kommen (BÜTTNER ET AL. 2014). Dies stellt eine effektive Alternative zur manuellen Eingabe dar.
- *Bildaufnahme (#16)*
Zur Dokumentation oder späteren Auswertung kann eine Bildaufnahme erfolgen. Dies kann bspw. mittels einer Kamera am Arbeitsplatz realisiert werden (BLÜMLING & REITHINGER 2015).
- *Erkennung Fügevorgänge (#17)*
Ist das Assistenzsystem in der Lage, Fügevorgänge zu erkennen, können Qualitätssicherungsfunktionen implementiert werden. Eine Erkennung kann bspw. durch Tiefenbildanalyse (BANNAT 2014) oder durch RGB- und Infrarot-Tiefensensor (BÄCHLER ET AL. 2015) erfolgen.
- *Erkennung Greifvorgänge (#18)*
Die Erkennung von Greifvorgängen ist in vielen Fällen technisch einfacher umzusetzen als die Erkennung von Fügevorgängen. Sie wird häufig in Kombination mit Pick-by-Light-Systeme angewandt (MÜLLER ET AL. 2014). Ziel ist die frühzeitige Vermeidung von Variantenfehlern.
- *Überwachung von Prozessparametern (#19)*
Am Arbeitsplatz aufgenommene Prozessparameter können dem Assistenzsystem bereitgestellt werden. Dies können bspw. Drehmomentverläufe eines intelligenten Drehmomentschraubers sein, oder auch Messwerte zur thermografischen Analyse einer Klebeverbindung (MÜLLER ET AL. 2014).

6.6 Fazit

Durch die Beschreibung des Informationsflusses zwischen kognitivem Assistenzsystem, Montagemitarbeiter, IT-Systemen und Arbeitsplatz konnten sechs einzelne Informationsflüsse und sechs Grundtypen an Assistenzfunktionen definiert werden. Eine Untersuchung von Realisierungen kognitiver Assistenzsysteme zeigt, dass die Informationsflüsse in 19 verschiedene Fähigkeiten unterteilt werden können. Mittels dieser Fähigkeiten kann nun die Brücke zwischen technologiefreier Beschreibung einer Assistenzfunktion und einer Technologie- und Komponentendatenbank geschlagen werden, die mittels des Systemmodells aus Kapitel 5 gestaltet ist. Mit dem Systemmodell und der Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen wurden die wesentlichen Modelle entwickelt, welche für eine methodische Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage notwendig sind. Im folgenden Kapitel soll nun die Einbindung dieser zwei Modelle in den Einführungsprozess demonstriert werden. Dabei wird auch darauf eingegangen, wie Assistenzfunktionen konzipiert und alternative technologische Lösungen miteinander verglichen werden können.

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

7.1 Übersicht

In den vorherigen Kapiteln wurden zentrale Modelle zur Beschreibung von Aufbau und Funktionen kognitiver Assistenzsysteme beschrieben. In diesem Kapitel werden diese Modelle genutzt, um eine methodische Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage zu realisieren.

Die Methode besteht aus fünf Schritten (Abbildung 21). Sie beginnt mit einer Bedarfsanalyse des Montageprozesses. Bei der partizipativen Technologievorauswahl werden die zukünftigen Nutzer durch Erprobungen und Befragungen in den Einführungsprozess eingebunden. Aus den ermittelten Anforderungen werden Assistenzfunktionen konzipiert und mittels der Technologie- und Komponentendatenbank alternative Assistenzsystemlösungen generiert. Die Entscheidung für das finale System wird auf Basis einer Wirtschaftlichkeitsbewertung getroffen.

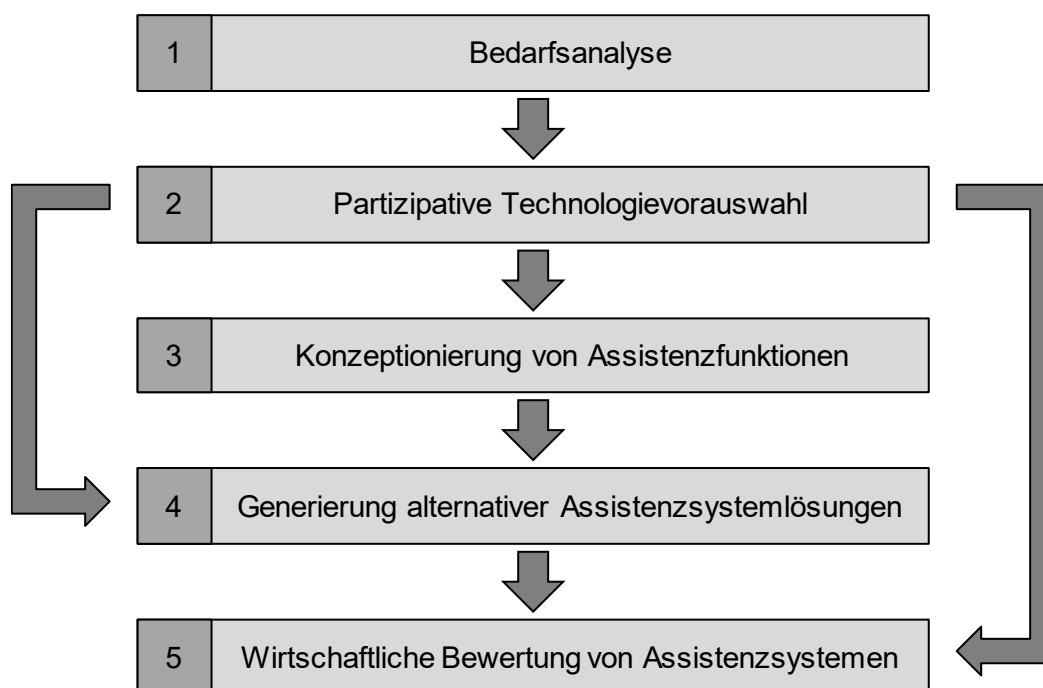


Abbildung 21: Hauptschritte und deren Vorrangbeziehungen der Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Bei der Entwicklung der Methode wurden zu dem in Abschnitt 2.4.3 dargestellten Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (DIN EN ISO 9241-210) Aufgaben ermittelt, die bei der Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage durchzuführen sind (Tabelle 12). Aufgrund der großen Bedeutung der Einbindung von Mitarbeitern in den Einführungsprozess zur Steigerung der Akzeptanz, wurden Elemente der ersten beiden Entwicklungsschritte kombiniert.

In diesem Kapitel wird der Ablauf der Methode sequenziell beschrieben. Angelehnt an den Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (DIN EN ISO 9241-210) können die Methodenschritte aber auch iterativ durchlaufen werden, sofern Anforderungen nicht erfüllt werden konnten oder sich zusätzliche Anforderungen im Laufe des Einführungsprozesses manifestieren.

Tabelle 12: Zuordnung der Entwicklungsschritte der DIN EN ISO 9241-210 zur entwickelten Methode

Entwicklungsschritte nach DIN EN ISO 9241-210	Durchzuführende Aufgaben	Entwickelte Methodenschritte
Verstehen und Festlegen des Nutzungskontexts	Analyse des Montageprozesses	Bedarfsanalyse
	Analyse des Montagepersonals	Partizipative Technologievorauswahl
Festlegung der Nutzungsanforderungen	Umgebungsspezifische Anforderungen	
	Mitarbeiterbezogene Anforderungen	
Erarbeitung von Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen	Montageprozessspezifische Anforderungen	Konzeptionierung von Assistenzfunktionen
	Technologiefreie Gestaltung der Assistenz	Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen
Evaluierung von Gestaltungslösungen anhand der Anforderungen	Auswahl von Komponenten und Technologien	
		Bewertung des Nutzens der konzipierten Assistenzsysteme

7.2 Bedarfsanalyse

7.2.1 Übersicht

Im ersten Methodenschritt wird der vorliegende Montageprozess analysiert, um die grundsätzliche Unterstützungsart festzulegen (Abbildung 22). Hierfür ist eine Beschreibung des Montageprozesses notwendig. Zudem müssen dem Anwender Methode die zukünftigen Herausforderungen des Unternehmens bekannt sein, damit ein bedarfsgerechtes Assistenzsystem eingeführt werden kann.




Input 	Ablauf 	Output 
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschreibung des Montageprozesses (z. B. Konstruktionszeichnungen, Stücklisten, Arbeitspläne, Werkzeuge) ▪ Zukünftige Herausforderungen des Unternehmens (z. B. Stückzahlen) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einheitliche Beschreibung von Prozessschritten 2. Bewertung von Komplexitätsdimensionen 3. Auswahl von Grundtypen für Assistenzfunktionen 4. Abschätzung des Kostenrahmens 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundtypen für Assistenzfunktionen ▪ Kostenrahmen

Abbildung 22: Übersicht über den Methodenschritt „Bedarfsanalyse“

Auf Grundlage dieser Daten erfolgen eine einheitliche Beschreibung von Prozessschritten sowie jeweils eine Bewertung von Komplexitätsdimensionen. Daraus werden Grundtypen auf Basis des in Kapitel 6 dargestellten Modells abgeleitet und ein Kostenrahmen abgeschätzt.

7.2.2 Beschreibung von Prozessschritten

Um den Assistenzbedarf für einen Montageprozess zu analysieren, muss dieser in einzelne, einheitlich beschriebene Prozessschritte unterteilt werden. Hierfür ist die Granularität der Beschreibung einzelner Prozessschritte festzulegen. Bei einer zu hohen Granularität steigt der Aufwand der Methode stark an. Bei einer zu geringen Granularität sinkt die Qualität des Ergebnisses der Methode.

Bei der inhaltlichen Clusterung der Prozessschritte wird das in Abschnitt 2.2.1 dargestellte Modell von LOTTER (2012A) genutzt, welches die Funktionen der Montage beschreibt. Bei der Anwendung des Modells sollen folgende Regeln beachtet werden.

1. Keiner der Prozessschritte besteht aus mehr als einer Montagefunktion nach LOTTER (2012A).

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

2. Bestehen zwei aufeinanderfolgende Prozessschritte aus der gleichen Funktion, so müssen sich diese im Material oder Werkzeug unterscheiden.
3. Variantenarbeitsgänge, deren Material sich nur geringfügig unterscheidet (z. B. Farbe), werden zu einem Prozessschritt zusammengefasst.

Die erste Regel ist notwendig, um eine zu grobe Beschreibung der Prozessschritte zu vermeiden. Beispielsweise sollte der Assistenzbedarf für einen Prüfschritt getrennt von einem Reinigungsschritt oder einer Verschraubung analysiert werden können.

Die zweite Regel ist notwendig, um eine zu detaillierte Beschreibung der Prozessschritte zu vermeiden. Wird beispielsweise eine Komponente mit vier gleichen Schrauben mit dem gleichen Werkzeug verschraubt, so soll dies als einziger Prozessschritt betrachtet werden.

Bei der Montage variantenreicher Produkte soll für die Einführung des Assistenzsystems die jeweilige Maximalstückliste bzw. der Maximalarbeitsplan betrachtet werden, der alle möglichen Elemente der Variantenbildung enthält. Bei der Bedarfsanalyse sind Variantenteile, die sich nur geringfügig unterscheiden (z. B. Farbe der Komponente) zusammenzufassen. Wird jedoch keine Vorkommissionierung durchgeführt, können z. B. Variantenfehler durch falsches Greifen entstehen, was bei diesem Prozessschritt als mögliche Fehlerquelle zu berücksichtigen ist.

7.2.3 Bewertung von Komplexitätsdimensionen

Für die definierten Prozessschritte wird im nächsten Schritt die Komplexität bewertet, um ein quantitatives Maß für den jeweiligen Assistenzbedarf zu ermitteln. Hierfür wurden in den Abschnitten 3.2 und 3.5 bereits mehrere Modelle zur Beschreibung der Komplexität in der manuellen Montage und des Assistenzbedarfs dargestellt. Auf Basis der Annahme einer finalisierten Konstruktion des Produkts, ergeben sich folgende Anforderungen:

- Ausschließliche Bewertung von Komplexitätsdimensionen, auf die das kognitive Assistenzsystem Einfluss nehmen kann.
- Mehrdimensionale Bewertung der Komplexität anstelle einer Aggregation auf eine singuläre Kennzahl pro Prozessschritt oder Arbeitsplatz

Die Modelle in den Abschnitten 3.2 und die dargestellten Modelle zur Komplexitätsbewertung in der Montage können bei der Einführung eines Assistenzsystems

nur adaptiert genutzt werden, da sie häufig eine vollumfängliche Bewertung der Arbeitsplatzkomplexität anstreben. Ein Assistenzsystem kann jedoch bspw. nicht in die Produktkomplexität eingreifen, da zum Zeitpunkt der Montage die Konstruktion bereits finalisiert ist.

Eine Aggregation aller Teilkomplexitäten zu einer Arbeitsplatzkomplexität wird für zahlreiche Einsatzzwecke benötigt, ist jedoch für die Ausgestaltung des Assistenzsystems hinderlich. Abhängig von einzelnen Komplexitätstreibern soll eine bedarfsgerechte Zuordnung der unterschiedlichen Grundtypen von Assistenzfunktionen erfolgen.

Als oberste Strukturierung der Komplexitätsdimensionen soll eine Anlehnung an die in Abschnitt 2.3.1 dargestellte Taxonomie der Assistenzsysteme nach BENGLER ET AL. (2017) erfolgen. Assistenzsysteme unterstützen in der Vorbereitung eines Montageschritts bei der Wahrnehmung und Entscheidung. Die Unterstützung bei der Durchführung des Montageschritts im Bereich der mechanischen Ausführung fällt zwar in den Bereich der physischen Assistenz, wird jedoch die korrekte Ausführung lediglich durch eine Informationsverarbeitung abgesichert, so wird dies dem Anwendungsbereich kognitiver Assistenzsysteme zugerechnet. Nach Durchführung des Montageschritts wird in vielen Anwendungsfällen eine Dokumentation benötigt (DIN EN 9100). Als oberste Strukturierung sollte die Komplexität von Wahrnehmung, Durchführung und Dokumentation betrachtet werden, um eine für kognitive Assistenzsysteme bezogene Bewertung der Komplexität durchzuführen (Abbildung 23).



Abbildung 23: Zu bewertende Komplexitätsdimensionen
(in Anlehnung an MERKEL ET AL. (2018A))

Bei der Bewertung der Komplexitätsdimensionen wird das Berechnungsverfahren der Risikoprioritätszahl (RPZ) der FMEA genutzt. Die RPZ bewertet die Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers und multipliziert diese mit der Schadenshöhe auf einer Skala von eins bis zehn. Im Kontext der FMEA sind zwar Schwächen bei der RPZ bekannt, mehrere alternative Berechnungsverfahren konnten jedoch keine bessere Bewertung erzielen

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

(WERDICH 2012). Es wird daher empfohlen, den jeweiligen Gesamtwert im Team zu diskutieren. Hierfür sollen Teilnehmer aus Entwicklung, Montage, Qualitätssicherung und IT eingebunden werden. Im Kontext der Assistenzsysteme nutzt BREITKOPF (2018) ebenfalls das Berechnungsverfahren der RPZ, um die Prozessprioritätszahl (PPZ) zu definieren, die aus Austrittshäufigkeit, Wissensverlustrisiko und Prozessbedeutsamkeit besteht. BREITKOPF (2018) nutzt diese, um einzelne Prozesse in die entwickelte kompetenzorientierte Assistenz aufzunehmen.

Bei der Bewertung der Wahrnehmungskomplexität (Tabelle 13) fließt auch die Qualifikation der Mitarbeiter in die Bewertung ein. Ziel ist es, eine Über- und Unterforderung der Mitarbeiter zu vermeiden. Der Mitarbeiterqualifikationsfaktor (MQ) beschreibt, inwiefern Mitarbeiter für den jeweiligen Montageschritt qualifiziert und eingearbeitet sind. Der Individualisierungsgrad beschreibt, inwiefern der Montageschritt von Varianten beeinflusst wird. Die Änderungsfrequenz gibt an, wie häufig entwicklungsseitige Änderungen am Montageschritt durchgeführt werden. Alle drei Faktoren steigern die Komplexität in der Wahrnehmung des Montageschritts.

*Tabelle 13: Bewertung der Wahrnehmungskomplexität
(in Anlehnung an MERKEL ET AL. 2018A)*

Wahrnehmungskomplexität (WK)	Unteres Limit: 1	Oberes Limit: 10
Mitarbeiterqualifikationsfaktor (MQ)	Alle eingesetzten Mitarbeiter sind für den Montageschritt qualifiziert und eingearbeitet.	Der Montageschritt wird regelmäßig von nicht eingearbeiteten Mitarbeitern durchgeführt.
Individualisierungsgrad (IG)	Der Montageschritt ist statisch und besitzt keine Varianz.	Der Montageschritt wird in Losgröße 1 durchgeführt und variiert in jedem Auftrag.
Änderungsfrequenz (AEF)	Der Montageschritt wird nicht von Produktänderungen beeinflusst.	Der Montageschritt ändert sich häufig aufgrund von Produktänderungen.

Die Berechnung der Wahrnehmungskomplexität erfolgt mit der Formel (1):

$$WK = MQ \cdot IG \cdot AEF \quad (1)$$

Zur Bewertung der Entscheidungskomplexität (Tabelle 14) erfolgt eine inhaltliche Anlehnung an die RPZ der FMEA. Schadenshöhe und Auftretenswahrscheinlichkeit werden entsprechend der FMEA bewertet. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit soll in diesem Kontext die Wahrscheinlichkeit beschreiben, dass der Montagefehler noch vor Auslieferung an den Kunden erkannt werden kann.

Tabelle 14: Bewertung der Durchführungscomplexität
(in Anlehnung an MERKEL ET AL. 2018A)

Durchführungs-complexität (DK)	Unteres Limit: 1	Oberes Limit: 10
Schadenshöhe (SH)	Das Auftreten eines Montagefehlers hat keinen Einfluss auf die Produktqualität.	Das Auftreten eines Montagefehlers führt zu Gefährdungen.
Auftretenswahrscheinlichkeit (AW)	In der Vergangenheit ist kein Auftreten eines Montagefehlers erkennbar.	In der Vergangenheit ist ein sehr häufiges Auftreten eines Montagefehlers erkennbar.
Entdeckungswahrscheinlichkeit (EW)	Ein Montagefehler wird direkt im nächsten Schritt erkannt.	Ein Montagefehler kann in keinem der folgenden Prozessschritte mehr erkannt werden.

Die Berechnung der Durchführungscomplexität erfolgt mit der Formel (2):

$$DK = SH \cdot AW \cdot EW \quad (2)$$

Zur Bewertung der Dokumentationscomplexität (Tabelle 15) wird zuerst der Dokumentationsbedarf bestimmt. Dieser gibt an, ob von externen Parteien (z. B. Behörden) eine Dokumentation empfohlen bzw. für notwendig erklärt wird. Informationen können auch einen internen Wert besitzen, bspw. um Qualitätskennzahlen (z. B. zur statistischen Prozesskontrolle) zu erheben. Dabei ist neben dem Nutzen auch der Aufwand der Dokumentation zu berücksichtigen.

Tabelle 15: Bewertung der Dokumentationscomplexität
(in Anlehnung an MERKEL ET AL. 2018A)

Dokumentations-complexität (DOK)	Unteres Limit: 1	Oberes Limit: 10
Dokumentationsbedarf (DB)	Eine Dokumentation von Werten wird nicht von externen Parteien empfohlen.	Eine Dokumentation von Werten ist in diesem Prozessschritt vorgeschrieben.
Informationswert (IW)	Eine Dokumentation von Werten im Prozessschritt erzeugt keinen Mehrwert.	Eine Dokumentation von Werten im Prozessschritt ist sehr wertvoll.
Dokumentationsaufwand (DA)	Der Dokumentationsaufwand im Prozessschritt ist vernachlässigbar.	Der Dokumentationsaufwand übersteigt die Wertschöpfung um ein Vielfaches.

Die Berechnung der Dokumentationscomplexität erfolgt mit der Formel (3):

$$DOK = DB \cdot IW \cdot DA \quad (3)$$

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

7.2.4 Auswahl von Grundtypen für Assistenzfunktionen

Abhängig von den ermittelten Ausprägungen der Komplexität wird im ersten Methodenschritt eine Auswahl der benötigten Grundtypen getroffen. Dadurch wird bereits eine grundsätzliche Gestaltung des Informationsflusses des Assistenzsystems getroffen. Hierfür wurde eine Zuordnung von Komplexitätsdimensionen und Assistenzfunktionen entwickelt (Tabelle 16).

Tabelle 16: Zuordnung von Komplexitätsdimensionen zu Grundtypen der Assistenzfunktionen (in Anlehnung an MERKEL ET AL. 2018A)

		Komplexitätsdimensionen		
		Wahrnehmungskomplexität	Durchführungskomplexität	Dokumentationskomplexität
Assistenzfunktionen (Grundtyp)	Werkerinformation	■		
	Manuelle Dokumentation			■
	Produktaktualisierung		■	
	Automatisierte Dokumentation			■
	Qualitätssicherung		■	
	Manuelle Produktbeschreibung			■

Legende:

■: Assistenzfunktion ist der Komplexitätsdimension zugeordnet

Bei einer hohen Wahrnehmungskomplexität ist eine Unterstützung durch eine Werkerinformation anzustreben, die Informationen über Varianten bzw. Produktänderungen bereitstellt. Um eine hohe Durchführungskomplexität zu beherrschen kann eine Qualitätssicherung zum Einsatz kommen, die bei auftretenden Fehlern ein Signal an den Werker übermittelt. Zudem ist eine Produktaktualisierung denkbar, die Werkzeugparameter automatisiert einstellt, um eine Null-Fehler-Montage zu sichern. Eine digitale Unterstützung der Dokumentation kann manuell erfolgen, um Daten in IT-Systemen oder auf dem Produkt abzulegen. Alternativ kann auch eine automatisierte Dokumentation genutzt werden, welche automatisiert Daten der Montage generiert ohne Aufwände für Montagemitarbeiter zu erzeugen.

7.2.5 Abschätzung des Kostenrahmens

Auf Basis der Komplexitätsbewertung und Auswahl von Grundtypen entstehen zahlreiche Ansatzpunkte für Assistenzsysteme. Während eine Werkerinformation mit sehr geringem Aufwand um weitere Schritte erweitert werden kann, ist bspw. bei der Qualitätssicherung häufig eine schritt-spezifische Anbringung oder Konfiguration von Sensorik notwendig. Um zu vermeiden, dass wegen zahlreicher Anforderungen ein Assistenzsystem konzeptioniert wird, das zwar eine umfassende Unterstützung des Prozesses bietet, aber aufgrund der hohen Kosten nicht wirtschaftlich ist, muss frühzeitig ein Kostenrahmen definiert werden.

Dabei soll auf Basis der ermittelten Komplexitätsdimensionen, des ausgewählten Grundtyps und des verfügbaren Investitionsbudgets ein Kostenrahmen für das Assistenzsystem definiert werden. Dieser Kostenrahmen kann durch eine grobe Nutzenabschätzung bestimmt werden. Er dient in den folgenden Schritten als Obergrenze bei der Auswahl von Komponenten des Assistenzsystems. Er führt dazu, dass nicht nur technische, sondern auch wirtschaftliche Gesichtspunkte im Einführungsprozess betrachtet werden.

7.3 Partizipative Technologievorauswahl

7.3.1 Übersicht

Nach der Bedarfsanalyse erfolgt im zweiten Methodenschritt unter Einbindung der zukünftigen Nutzer eine Vorauswahl der Interaktionstechnologien (Abbildung 24). Ziel der partizipativen Technologievorauswahl ist die Identifikation derjenigen Interaktionstechnologien, die alle mitarbeiter- sowie umgebungsspezifische Anforderungen erfüllen. Hierfür wird ein spezieller Montagearbeitsplatz benötigt, an dem vor Ort verschiedene Interaktionstechnologien systematisch erprobt werden können. Zudem muss eine Auswahl der zukünftigen Nutzer als Versuchspersonen verfügbar sein. Im Rahmen der partizipativen Technologievorauswahl erfolgen die Auswahl der Technologien und die Planung der Erprobung. Das Feedback der Nutzer wird zu den einzelnen Interaktionstechnologien aufgenommen, um eine Auswahl akzeptierter Technologien zu treffen. Außerdem wird ein Feedback zu den Funktionalitäten des Gesamtsystems abgeholt, um schließlich im gemeinsamen Dialog die wichtigsten Funktionalitäten zu identifizieren. Durch die partizipative Technologievorauswahl beteiligen sich die zukünftigen Nutzer direkt

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

an der Einführung des Assistenzsystems. Durch ihre Beteiligung steigt die Akzeptanz und damit die Erfolgswahrscheinlichkeit des Einführungsprozesses.




Input 	Ablauf 	Output 
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Montagearbeitsplatz für Erprobung ▪ Auswahl zukünftiger Nutzer 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Auswahl von Technologien und Planung der Erprobung 2. Erprobung alternativer Technologien vor Ort 3. Aufnahme und Auswertung von Nutzerfeedback 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzerfeedback zu Interaktionstechnologien ▪ Feedback zu Funktionalitäten des Gesamtsystems

Abbildung 24: Übersicht über den Methodenschritt „Partizipative Technologievorauswahl“

7.3.2 Auswahl von Technologien und Planung der Erprobung

Zur Erprobung wurde ein Montagearbeitsplatz aufgebaut (Abbildung 25), der mehrere Interaktionstechnologien (Tabelle 17) enthält. Die Technologien wurden nach den in Abschnitt 6.3 entwickelten Informationsflüssen geordnet und decken mit der Informationsausgabe und der Informationseingabe beide Formen der Interaktion ab. Zudem wurden die Technologien nach Modalitäten (visuell, auditiv, haptisch) eingeordnet. Auf Basis der im ersten Methodenschritt ausgewählten Assistenzfunktionen kann vor der Erprobung bereits eine Vorauswahl von Technologien erfolgen. Diese Vorauswahl kann auf dem Montageprozess, den Umgebungsbedingungen oder den Vorerfahrungen basieren. Ist ausgehend vom Montageprozess und den im ersten Methodenschritt abgeleiteten Grundtypen keine Informationseingabe erforderlich, so kann die Erprobung dieser Technologien übersprungen werden. Liegen spezielle Umgebungsbedingungen (z. B. Lärm) vor, die bestimmte Modalitäten (z. B. auditiv) bereits zweifellos ausschließen, so kann dies bereits in der Planung der Erprobung erfolgen. Teilnehmer der Erprobung sollen maßgeblich Montagemitarbeiter sein, um relevante Akzeptanzfaktoren wie Tragekomfort (MERHAR ET AL. 2018) mit in die Bewertung einfließen zu lassen.



Abbildung 25: Entwickelter Montagearbeitsplatz zur partizipativen Technologievorauswahl

Mittels des entwickelten Montagearbeitsplatzes werden ein Planetengetriebe und eine Kupplung als Beispielprodukte unter Anleitung des Assistenzsystems montiert. Bei den verschiedenen Montageschritten können jeweils unterschiedliche Technologien genutzt werden. Der Arbeitsplatz wurde in seinen Dimensionen für einen mobilen Einsatz entwickelt. Im Rahmen des zweiten Methodenschritts soll er vor Ort am jeweiligen Montagestandort genutzt werden. Dies ist notwendig, um eine Erfüllung aller umgebungsspezifischen Anforderungen (z. B. Öl, Schmierstoffe, Lärm, Staub) zu erproben. Unter Laborbedingungen kann zwar die Akzeptanz der Mitarbeiter getestet werden, nicht aber die Umgebungsbedingungen.

7.3.3 Ablauf der Erprobung alternativer Technologien vor Ort

Die Erprobung unterschiedlicher Technologien mittels des Demonstrators erfolgt vor Ort am jeweiligen Montagestandort des jeweiligen Unternehmens. Im Rahmen einer Einführung wird allen Beteiligten der Nutzen verschiedener Komponenten kognitiver Assistenzsysteme erläutert und es erfolgt eine Einführung in den Demonstrator und das Beispielprodukt. Die Erprobung selbst erfolgt für jeden Mitarbeiter einzeln in zwei Abschnitten und mit folgendem Ablauf:

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

- Erprobungsabschnitt I
 - Kurzvorstellung der Technologien (ca. 5 Minuten)
 - Eigenständige Erprobung (ca. 15 Minuten)
- Erprobungsabschnitt II
 - Bearbeitung eines Fragebogens (ca. 10 Minuten)
 - Diskussion (ca. 5 Minuten)
 - Anfertigung von Notizen (ca. 5 Minuten)

Im ersten Erprobungsabschnitt werden die Technologien am Demonstrator (Tabelle 17) vorgestellt. Im Anschluss erfolgt eine eigenständige Erprobung durch den jeweiligen Nutzer. Bei Komponenten, die zwei Technologien bereitstellen, ist darauf zu achten, dass nicht die Komponente als Gesamtheit, sondern die jeweilige Technologie getestet wird. Dies umfasst bspw. Touch-Funktion und Display bei einem Touchscreen oder die Spracheingabe und -ausgabe bei einem Headset.

Tabelle 17: Technologien des aufgebauten Arbeitsplatzes für die Erprobung

Informationsfluss	Modalität	Technologie
Informationsausgabe	Visuell	Display
		Pick-by-Light-System
		Tischprojektion
	Auditiv	Lautsprecher
		Headset
Informationseingabe	Haptisch	Touch-Eingabe mittels Displays
		Gestensteuerungsarmband (Unterarm)
		Gestensteuerungsarmband (Handgelenk)
		Berührungslose Gestensteuerung
		Buttons
	Auditiv	Spracheingabe

Im zweiten Erprobungsabschnitt wird die Akzeptanz der erprobten Technologien mittels eines Fragebogens abgefragt und in einer anschließenden Diskussion allgemeine Anforderungen an das Assistenzsystem definiert. Beide Abschnitte erfordern jeweils 20 Minuten. Es wird empfohlen den Workshop zur partizipativen Technologievorauswahl mit zwei Experten durchzuführen. So kann bei einer Durchlaufzeit von 40 Minuten eine Taktzeit von 20 Minuten erzielt werden.

7.3.4 Aufnahme und Auswertung von Nutzerfeedback

Ziel des Nutzerfeedbacks ist es die Usability einzelner Interaktionstechnologien zu bewerten sowie ein allgemeines subjektives Feedback zum Assistenzsystem zu erhalten. Methodisch kommen hierfür quantitative sowie qualitative Methoden zum Einsatz. Mittels eines Kurzfragebogens werden quantitativ die Einfachheit, Zuverlässigkeit und Bereitschaft zur Nutzung bewertet. Im Rahmen von offenen Fragen wird zudem qualitativ zusätzliches Feedback aufgenommen. Durch die Erprobung vor Ort fließen sowohl nutzerspezifische, prozessspezifische als auch umgebungsspezifische Anforderungen in den Einführungsprozess ein.

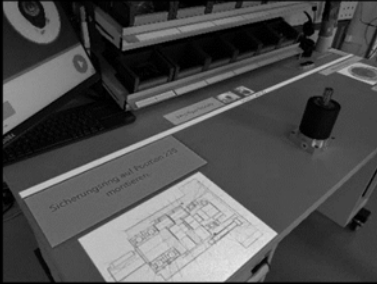
Anleitungen über den Beamer					
	Informationen über eine Projektion auf der Arbeitsfläche				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde die Anleitungen über den Beamer einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Beamer-System für Anleitungen funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z. B. Anleitungen) nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

Abbildung 26: Ausschnitt des quantitativen Teils des Fragebogens der partizipativen Technologievorauswahl

Der quantitative Teil des Fragebogens (Abbildung 26) teilt sich in die Bereiche Informationseingabe sowie Informationsausgabe nach den in Abschnitt 7.3.3 dargestellten Technologien auf.

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Pro Ein- und Ausgabetechnologie erfolgt eine separate Bewertung der Technologie. Der Fragebogenabschnitt beginnt jeweils mit dem Titel der Technologie sowie einem Foto. Das Foto dient zur Sicherstellung, dass die Erfahrungen bei der Erprobung den Fragebogenabschnitten korrekt zugeordnet werden. Zusätzlich wird textuell die Funktionalität der jeweiligen Technologie erläutert.

In der ersten Frage wird pro Interaktionstechnologie die Einfachheit der Nutzung bewertet. Diese ist notwendig, um möglichst schnell das Assistenzsystem nutzen zu können. Das Assistenzsystem soll die Komplexität am Arbeitsplatz senken und nicht erhöhen. In der zweiten Frage wird die Zuverlässigkeit abgefragt, die als weiteres notwendiges Kriterium erachtet wird. Nur bei einer hohen Prozesssicherheit der Technologie unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen ist ein Einsatz im Assistenzsystem sinnvoll. Eine hohe Zuverlässigkeit allein ist jedoch nicht ausreichend. Daher wird in einer dritten Frage die Bereitschaft zur Nutzung abgefragt.

Die Bewertungen der Technologie erfolgen mit Hilfe einer fünfstufigen Likert-Skala, sodass die Zustimmung zu den jeweiligen Aussagen graduell getroffen werden kann. Für die anschließende Auswertung der Fragebögen werden diese Antworten in Werte von eins bis fünf umcodiert (Tabelle 18).

Tabelle 18: Aussagen und jeweilige Zahlenwerte für die Auswertung

Bewertung der Aussagen im Fragebogen	Zahlenwert für quantitative Auswertung
stimme gar nicht zu	1
stimme eher nicht zu	2
teils/teils	3
stimme eher zu	4
stimme voll zu	5

Die Auswertung des quantitativen Teils erfolgt durch Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung der einzelnen Technologien für alle Teilnehmer der Erprobung. Die hier ermittelten Werte werden genutzt, um diejenigen Technologien zu identifizieren für die keine ausreichende Akzeptanz im Assistenzsystem vorliegt. Diese werden bei der Komponentenauswahl in den folgenden Schritten ausgeschlossen.

Der qualitative Teil des Nutzerfeedbacks umfasst folgende zwei Leitfragen:

- „Wie sollen Informationen und Anleitungen gestaltet und dargestellt werden?“

- „Was sollte das System neben der Bereitstellung von Informationen noch können?“

Das im Rahmen dieser Leitfragen aufgenommene Nutzerfeedback wird über alle Nutzer aggregiert und bildet die Basis im folgenden Schritt, Assistenzfunktionen mittels User Stories zu formulieren.

7.4 Konzeptionierung von Assistenzfunktionen

7.4.1 Übersicht

Im dritten Methodenschritt erfolgt auf Basis der ermittelten Grundtypen, des gewonnenen Feedbacks sowie der in Abschnitt 6.5 entwickelten Beschreibung von Fähigkeiten eine detaillierte Konzeptionierung von Assistenzfunktionen (Abbildung 27). Auf Basis von User Stories werden Funktionalitäten des Assistenzsystems erfasst und mittels Grundtypen und Fähigkeiten spezifiziert werden. Diese spezifizierten Assistenzfunktionen sollen zudem priorisiert werden. Auf Basis der Priorisierung können alternative Konzepte kognitiver Assistenzsysteme abgeleitet werden, die sich in ihrem Funktionsumfang unterscheiden.




Input 	Ablauf 	Output 
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundtypen für Assistenzfunktionen ▪ Feedback zu Funktionalitäten des Gesamtsystems 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formulierung von Assistenzfunktionen als User Stories 2. Spezifizierung und Priorisierung der Assistenzfunktionen 3. Ableitung alternativer Konzepte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alternative detailliert spezifizierte Systemkonzepte

Abbildung 27: Übersicht über den Methodenschritt „Konzeptionierung von Assistenzfunktionen“

7.4.2 Formulierung von Assistenzfunktionen als User Story

Mittels einer User Story werden in der Softwareentwicklung Beschreibungen von Funktionalitäten einer Software beschrieben, welche wertvoll für den Nutzer der Software sind (COHN 2004). User Stories sind in Ich-Form formuliert. Es existieren verschiedene Schablonen für User Stories, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden sollen. Eine Schablone, die im sog. „Extreme Programming“ genutzt wird, besteht aus den folgenden Bausteinen (COHN 2004):

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

- Nutzer: Mit dem Nutzer wird die jeweilige Rolle des Anwenders beschrieben. Im Rahmen der Konzeptionierung von Assistenzfunktionen ist die Nutzerrolle die des Monteurs.
- Funktionalität: Die Funktionalität beschreibt die Art der Assistenz des Assistenzsystems. Aus ihr können die benötigten Fähigkeiten abgeleitet werden.
- Nutzen: Der Nutzen beschreibt den Zweck des Assistenzsystems. Er ist auch relevant für die Wirtschaftlichkeitsbewertung des Systems.

Eine beispielhafte User Story zur Beschreibung von Assistenzfunktionen kann lauten: *„Als Monteur möchte ich von einer Eingriffskontrolle bei falscher Teilewahl gewarnt werden, um Variantenfehler zu vermeiden“*

Die Gewinnung und Formulierung der User Stories erfolgt durch Verknüpfung der ermittelten Grundtypen mit den Erfahrungen und dem Feedback der partizipativen Technologievorauswahl. Die Ausformulierung findet in kooperativ durch Anwender des Assistenzsystems und Anwender der Methode statt. Zu einem Grundtyp können auch mehrere User Stories entstehen.

Auf Basis der User Story finden im Anschluss eine detaillierte technische Spezifikation und die Implementierung statt. In dieser Arbeit erfolgt dies durch eine Zuordnung der Grundtypen und Fähigkeiten.

7.4.3 Spezifizierung und Priorisierung der Assistenzfunktionen

Auf Basis einer User Story ist es einfach möglich Funktionalitäten zu beschreiben. Für die systematische Einführung von kognitiven Assistenzsystemen in der manuellen Montage müssen die User Stories jedoch in eine Struktur übersetzt werden, aus der methodisch die Komponentenauswahl sowie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung abgeleitet werden kann. Hierfür wurde eine Schablone (Abbildung 28) zur Spezifizierung von Assistenzfunktionen entwickelt. Diese enthält alle relevanten Objekte, die für die weiteren Schritte in Einführungsprozess benötigt werden.

7.4 Konzeptionierung von Assistenzfunktionen

<i>id</i>	<i>name</i>	<i>priority</i>
<i>basic_type</i>	<i>user_story</i>	
	<i>input_capability</i>	<i>output_capability</i>

Abbildung 28: Schablone zur Spezifizierung von Assistenzfunktionen

Die Schablone besteht aus sieben Objekten. Eine Assistenzfunktion wird durch folgende sieben Elemente spezifiziert:

- *id*: Mit einer Identifikationsnummer werden die entwickelten Assistenzfunktionen laufend durchnummeriert.
- *name*: Ein Name beschreibt die Assistenzfunktion. Er ist eindeutig unter den Assistenzfunktionen.
- *priority*: Mit Hilfe der Priorität werden Assistenzfunktionen entweder mit *Muss* oder *Kann* priorisiert.
- *basic_type*: Jeder Assistenzfunktion wird einer der sechs entwickelten Grundtypen zugeordnet.
- *user_story*: Die entwickelte User Story wird ebenfalls der Assistenzfunktion zugeordnet.
- *input_capability*: Durch sie wird die notwendige Fähigkeit des Informationsflusses in Richtung des Assistenzsystems beschrieben.
- *output_capability*: Sie bezeichnet die notwendige Fähigkeit des Informationsflusses aus Richtung des Assistenzsystems.

Beim Ausfüllen der Schablone ist es notwendig, Assistenzfunktionen möglichst feingranular zu beschreiben, um einen effektiven anschließenden Auswahlprozess zu ermöglichen. User Stories sollten soweit in einzelne Assistenzfunktionen aufgeteilt werden, dass sie einem Grundtyp zugeordnet werden können und jeweils einen Informationsfluss in Richtung und einen Informationsfluss aus Richtung des Assistenzsystems beinhalten. Die Assistenzfunktion „Als Monteur möchte ich durch ein Pick-by-Light-System mit Eingriffskontrolle bei Greiftätigkeiten unterstützt werden, um die korrekten Teile zu greifen.“ enthält zwei Grundtypen, die

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Werkerinformation und die Qualitätssicherung. Diese User Story ist aufzuteilen in „Als Monteur möchte ich durch ein Pick-By-Light-System unterstützt werden, um direkt die benötigten Variantenteile zu erkennen.“ vom Typ Werkerinformation sowie „Als Monteur möchte ich von einer Eingriffskontrolle bei falscher Teilewahl gewarnt werden, um Variantenfehler zu vermeiden.“ Vom Typ Qualitätssicherung. Durch die Aufteilung der User Stories wird die Anforderung erfüllt, dass jeweils genau ein Grundtyp der Assistenzfunktion zugeordnet wird.

Bei der Spezifikation und Priorisierung der Assistenzfunktionen ist ein kontinuierlicher Abgleich mit der in der Bedarfsanalyse vorausgegangenen Auswahl an Grundtypen durchzuführen. Dabei ist sicherzustellen, dass alle benötigten Funktionalitäten in das Assistenzsystem einfließen. Um unterschiedliche Bedarfe und Aufwände zur Realisierung bereits in einer frühen Phase des Einführungsprozesses zu berücksichtigen, ist eine Priorisierung in die Kategorien *Muss* und *Kann* möglich. Hierfür wurde eine Vierfeldertafel (Tabelle 19) entwickelt, die die Auswahl der Priorisierung unterstützt. Liegt auf Basis der Bedarfsanalyse ein hoher Bedarf für eine Assistenzfunktion vor und wird der Implementierungsaufwand als gering eingeschätzt, so ist diese als *Muss*-Assistenzfunktion zu bewerten. Liegt eine Assistenzfunktion vor, für die zwar ein hoher Bedarf, aber auch ein hoher Aufwand besteht, so ist diese als *Kann*-Assistenzfunktion einzuordnen, um die Entscheidung im Rahmen der späteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu treffen. Assistenzfunktionen, die zwar mit niedrigem Aufwand umgesetzt werden können, für die aber auch ein geringer Bedarf besteht, werden ebenfalls mit *Kann* bewertet, um eine unnötig hohe Komplexität im Assistenzsystem selbst zu vermeiden. Assistenzfunktionen, für die ein niedriger Bedarf besteht und welche nur mit hohem Aufwand umsetzbar sind, werden in dieser Phase aussortiert, um die weitere Detaillierung sowie spätere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf die relevanten Entscheidungsaspekte zu fokussieren.

Tabelle 19: Vierfeldertafel zur Auswahl der Priorisierung

		Bedarf	
		Hoch	Niedrig
Aufwand	Niedrig	Muss	Kann
	Hoch	Kann	Keine Berücksichtigung

Die jeweiligen Fähigkeiten sind aus dem in Abschnitt 6.5 entwickelten Fähigkeitsmodell zu wählen. Mithilfe der Fähigkeiten wird in den weiteren Methoden-

schritten die Brücke zwischen den Assistenzfunktionen und der Komponentenauswahl ermöglicht. Dadurch wird ein durchgängiger methodischer Prozess realisiert, der ausgehend von textuell formulierten User Stories eine Auswahl konkreter Hardware- und Softwarekomponenten treffen kann.

Für das Beispiel der Eingriffskontrolle wurde eine Spezifikation einer Assistenzfunktion (Abbildung 29) entwickelt. In diesem Fall wurde die Eingriffskontrolle mit *Kann* bewertet. Das Auftrennen von User Stories ermöglicht auch eine unterschiedliche Priorisierung. Wird das „Pick-By-Light-System“ mit *Muss* bewertet und die Eingriffskontrolle mit *Kann*, so wird im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung analysiert, ob die Kosten der zusätzlichen Eingriffskontrolle gegenüber dem zusätzlichen Nutzen vertretbar sind. Die Spezifikation zeigt hier grafisch den Grundtyp 5 (Qualitätssicherung) auf. Als Input-Fähigkeit wird in dieser Assistenzfunktion „Erkennung Greifvorgang“ benötigt. Die Ausgabe bei fehlerhaftem Griff erfolgt durch eine *Warnung*.

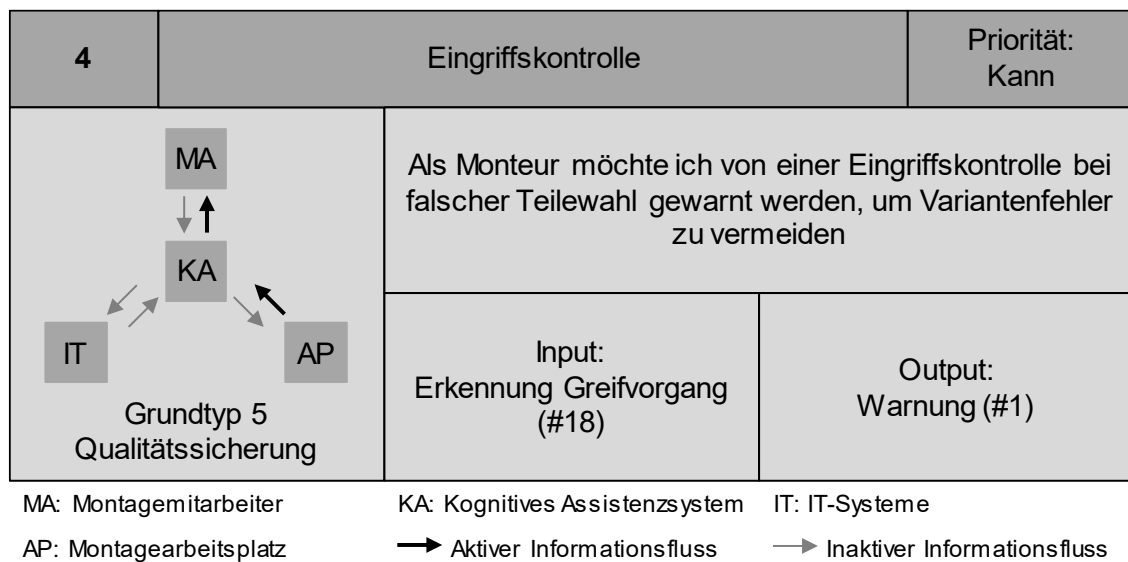


Abbildung 29: Beispielhafte Spezifikation einer Assistenzfunktion

Sobald alle User Stories auf Basis der Bedarfsanalyse und der partizipativen Technologievorauswahl spezifiziert sind, liegt ein Katalog vor, der Assistenzfunktionen mit *Muss* und *Kann*-Priorisierung enthält. Aus diesem Katalog sind anschließend Kombinationen zu finden, aus denen alternative Konzepte zu bilden sind, für die eine weitere Betrachtung erfolgt.

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

7.4.4 Ableitung alternativer Konzepte

Um eine Bewertung von Kosten und Nutzen vornehmen zu können, sollen in den folgenden Methodenschritten alternative Gesamtlösungen von Assistenzsystemen betrachtet werden. Hierfür sind aus dem entwickelten Katalog von *Muss* und *Kann*-Assistenzfunktionen alternative Konzepte kognitiver Assistenzsysteme zu bilden. Die unterschiedlichen Konzepte enthalten dabei definitionsgemäß alle *Muss*-Assistenzfunktionen. Sie werden ergänzt durch eine Auswahl an *Kann*-Assistenzfunktionen. Dabei kann eine Assistenzsystemlösung entstehen, die in der niedrigsten Stufe keine, bzw. in der höchsten Stufe alle *Kann*-Assistenzfunktionen enthält.

Werden bei n_{muss} *Muss*-Assistenzfunktionen und bei n_{kann} *Kann*-Assistenzfunktionen Assistenzsysteme gebildet, so ergibt sich die Anzahl der Assistenzsysteme $n_{möglich}$ bei kombinatorischem Vorgehen durch folgende Formel:

$$n_{möglich}(n_{kann}) = 2^{n_{kann}} \quad (4)$$

Jede *Kann*-Assistenzfunktion kann dabei entweder Teil des jeweiligen Assistenzsystems werden oder nicht. Dies ist mathematisch mittels einer Exponentialfunktion zu modellieren. Aufgrund des schnellen Wachstums der Exponentialfunktion (Tabelle 20) ergeben sich bereits bei drei *Kann*-Assistenzfunktionen neun kombinatorische Lösungen, welche einen zu hohen Aufwand für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung darstellen. Daher kann nur bei bis zwei *Kann*-Assistenzfunktionen eine vollständige kombinatorische Betrachtung erfolgen.

Tabelle 20: Werte der Exponentialfunktion bei der kombinatorischen Berücksichtigung von *Kann*-Assistenzfunktionen

Anzahl <i>Kann</i> -Assistenzfunktionen n_{kann}	Anzahl kombinatorisch möglicher Assistenzsysteme $n_{möglich}(n_{kann})$	Maßnahme
0	1	Kombinatorische Betrachtung aller Kombinationen von <i>Kann</i> -Assistenzfunktionen
1	2	
2	4	
3	8	Gruppierung von <i>Kann</i> -Assistenzfunktionen zu Ausbaustufen des Assistenzsystems
4	16	
5	32	
...	...	

Um den Aufwand der Methode handhabbar zu halten, müssen ab drei *Kann*-Assistenzfunktionen Reduzierungsmaßnahmen ergriffen werden. Hierfür stehen folgende Optionen zur Verfügung:

- *Veränderung der Priorisierung*: Bei der Priorisierung von *Kann*-Assistenzfunktionen als *Muss*-Assistenzfunktionen sowie bei der Entfernung von *Kann*-Assistenzfunktionen aus dem Lösungsraum kann die Anzahl der möglichen Lösungen reduziert werden. Dies sollte jedoch nur nach weiteren Workshops mit den relevanten Stakeholdern erfolgen, um diese Entscheidung nach Möglichkeit im Konsens zu treffen.
- *Gruppierung von Kann-Assistenzfunktionen*: Werden verschiedene *Kann*-Assistenzfunktionen (z. B. Qualitätssicherung) gruppiert, so sinkt die Anzahl der zu berücksichtigenden Assistenzfunktionen. Bei dieser Maßnahme sollen vor allem Assistenzfunktionen gruppiert werden, die in ihrer Umsetzung ähnlich sind und für die keine separate Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen soll. Wenn beispielsweise für zwei Assistenzfunktionen die gleichen Komponenten benötigt werden (z. B. Kamerasystem), ist in vielen Fällen entweder eine Umsetzung beider oder keiner der beiden Assistenzfunktionen sinnvoll und eine Gruppierung bereits in einer frühen Phase sinnvoll.
- *Einführung von Ausbaustufen*: Neben der Reduzierung vor der Bildung von kombinatorischen Alternativen, kann diese auch nach der Alternativenbildung erfolgen. Hierfür können Assistenzfunktionen oder Gruppen von Assistenzfunktionen als Ausbaustufen für andere eingesetzt werden. Kombinatorische Möglichkeiten, die eine Assistenzfunktion oder eine Gruppe mit Elementen der höheren Stufen enthalten, aber nicht die der geringeren Stufen, werden aus dem Lösungsraum entfernt. Somit können verschiedene Assistenzsysteme von einer „Basis-Version“ bis zu einer „High-End-Variante“ entwickelt werden.

Bei der manuellen Auswahl verschiedener Ausbaustufen können auch Anzahlen von Assistenzsystemlösungen entstehen, die nicht Werte der gezeigten Exponentialfunktion sind. Im Rahmen der Methode sollen nicht mehr als sechs alternative Systemkonzepte vorgeschlagen werden, um den Aufwand für die Komponentenauswahl sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beherrschen zu können.

7.5 Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen

7.5.1 Übersicht

Im vierten Methodenschritt werden auf Basis der entwickelten Systemkonzepte alternative Assistenzsystemlösungen generiert, welchen Kosten und Komponenten des Assistenzsystems zugeordnet sind (Abbildung 30). Hierzu wird die Technologie- und Komponentendatenbank, die nach dem in Kapitel 5 dargestellten Systemmodell aufgebaut ist, anwendungsfallspezifisch angepasst. Diese Anpassung basiert auf dem Nutzerfeedback des zweiten Methodenschritts. Im Anschluss erfolgt eine Verknüpfung der reduzierten Technologie- und Komponentendatenbank mit dem Fähigkeitenbedarf der spezifizierten Systemkonzepte. Hierbei wird für jede Alternative die kostenoptimale Komponentenauswahl durch eine lineare Optimierung ermittelt. Anschließend werden ungenutzte Fähigkeiten für eine mögliche Verwendung analysiert. Ungenutzte Fähigkeiten benennen weitere Fähigkeiten, die durch Komponenten bereitgestellt werden, welche aber nicht in einer User Story enthalten sind. Sie könnten mit geringem zusätzlichem Implementierungsaufwand realisiert werden. Im Anschluss erfolgte ein Budgetabgleich und ggf. eine Reduzierung von Alternativen. Ergebnisse des vierten Methodenschritts sind damit die Komponentenauswahl und die Kostenbewertung für eine ggf. reduzierte Anzahl an Assistenzsystemalternativen.




Input 	Ablauf 	Output 
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologie- und Komponentendatenbank ▪ Nutzerfeedback zu Interaktionstechnologien ▪ Alternative detailliert spezifizierte Systemkonzepte 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Anwendungsfallsspezifische Anpassung der Technologie- und Komponentendatenbank 2. Kostenbasierte Optimierung 3. Analyse ungenutzter Fähigkeiten 4. Budgetabgleich und Reduzierung von Alternativen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komponentenauswahl pro Assistenzsystemalternative ▪ Kostenbewertung pro Assistenzsystemalternative

Abbildung 30: Übersicht über den vierten Methodenschritt "Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen"

7.5.2 Anwendungsfallsspezifische Anpassung der Technologie- und Komponentendatenbank

Für den methodischen Einführungsprozess kognitiver Assistenzsysteme sind der einmalige Aufbau und die kontinuierliche Aktualisierung einer Technologie- und

7.5 Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen

Komponentendatenbank erforderlich. Diese Datenbank spannt den technologischen Lösungsraum auf, der für die Realisierung des Assistenzsystems zur Verfügung steht. Der Aufbau der Technologie- und Komponentendatenbank entspricht dem in Kapitel 5 dargestellten Systemmodell.

Tabelle 21: Beispielhafte Modellierung einer Hardwarekomponente in der Technologie- und Komponentendatenbank

Attribut	Datentyp	Beispielhafter Wert
name	string	T20
manufacturer	string	Caterpillar
weight	integer	650
investment_cost	integer	549
recurring_cost	integer	30
portability	boolean	true
wearable	boolean	false
battery_life	integer	20
operating_system	string	Windows
protection_class	string	IP67

In der beispielhaften Modellierung einer Hardwarekomponente (Tabelle 21) wurde ein Tablet-Computer dargestellt. Das Datenmodell enthält sowohl technische Spezifikationen (z. B. Akkulaufzeit in Stunden) als auch wirtschaftliche Attribute (z. B. laufende Kosten für Wartung, Updates und Strom in Euro pro Jahr).

Eine anwendungsfallsspezifische Reduzierung einzelner Komponenten erfolgt auf Basis der einzelnen Attribute. Dies kann beispielsweise den Ausschluss einzelner Hersteller (blacklist) oder die ausschließliche Betrachtung einzelner Hersteller (whitelist), z. B. aufgrund von Rahmenverträgen, umfassen. Anforderungen an die Tragbarkeit einzelner Komponenten können sich aus dem Prozess ergeben. Batterielaufzeiten sind mit dem jeweiligen Schichtmodell im Unternehmen zu vereinbaren. Zudem können in Unternehmen interne Vorgaben existieren, die einzelne Betriebssysteme von einer Verwendung in der unternehmenseigenen IT-Infrastruktur ausschließen. Der Einsatz einer Hardwarekomponente einer gewissen Schutzklasse kann aufgrund rauer Umgebungsbedingungen (z. B. Staub, Wasser) erforderlich sein.

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Im Gegensatz zu Komponenten werden Technologien im Systemmodell durch ihren Namen sowie ihren technologischen Reifegrad beschrieben. Bei der Modellierung des technologischen Reifegrads soll eine Anlehnung an das Technology Readiness Level (TRL) erfolgen. Diese neunstufige Systematik wurde ursprünglich von der NASA für Anwendungsfälle in der Raumfahrt entwickelt (DIN ISO 16290:2016-09), zuletzt jedoch auch zur Bewertung von Digitalisierungstechnologien in der Produktion genutzt (BISCHOFF 2015). Speziell für Technologien wurde ein vereinfachtes vierstufiges System entwickelt (Tabelle 22).

Tabelle 22: *Technology Readiness Level nach DIN ISO 16290:2016-0 und entwickeltes vierstufiges System*

TRL nach DIN ISO 16290:2016-09	Entwickeltes vierstufiges System für Technologien kognitiver Assistenzsysteme
TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips (8-15 Jahre)	Stufe 1: Konzeptstudien
TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie	
TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie (5-13 Jahre)	Stufe 2: Einsatz in Forschungsprototypen
TRL 4: Versuchsaufbau im Labor	
TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung	Stufe 3: Einsatz in Industrieprototypen
TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung	
TRL 7: Prototyp im Einsatz (1-5 Jahre)	
TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich	Stufe 4: Erfolgreicher kommerzieller Einsatz
TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes	

Eine Technologie für Assistenzsysteme, die lediglich in Form von Ideen und Konzepten besteht, wird in Stufe 1 eingeordnet. Ein Einsatz von Technologien in Stufe 1 sollte in der industriellen Montage nicht erfolgen. Beim Aufbau im Forschungsumfeld können diese Technologien mit dem Ziel, einen Forschungsprototypen zu entwickeln, eingesetzt werden. Eine Technologie mit Einsatz von Forschungsprototypen hat ihre Funktionsfähigkeit nur unter speziellen Bedingungen gezeigt. Da noch keine Erprobung im industriellen Umfeld stattgefunden hat, sollten hier erst Erprobungen stattfinden, bevor ein umfangreicher Einsatz in der Industrie durchgeführt wird. Für den Einsatz einer Technologie im industriellen Umfeld sollte eine Technologie ab Stufe 3 genutzt werden, die bereits erfolgreich in

7.5 Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen

der Industrie eingesetzt worden ist. Aufgrund der geringen Verbreitung müssen hierbei jedoch Risiken, z. B. bei der Beschaffung von Ersatzteilen oder Zusatzgeräten in Kauf genommen werden. Technologien, die kommerziell verfügbar sind, werden mit Stufe 4 bewertet.

Neben der Wahl des Technologiereifegrads kann auch ein Ausschluss von einzelnen Interaktionstechnologien aufgrund der Ergebnisse der partizipativen Technologievorauswahl erfolgen. Für den Fall, dass keine partizipative Technologievorauswahl durchgeführt werden kann, wurde eine Tabelle entwickelt, die die Technologien unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zuordnet, die bei Auftreten der jeweiligen Bedingung zum Ausschluss führen (Tabelle 23).

Tabelle 23: Umgebungsbedingen und kritisch zu bewertenden Technologien kognitiver Assistenzsysteme

Umgebungsbedingung	Kritisch zu bewertende Technologien
Lärm	Spracheingabe
	Sprachausgabe
Schmierstoffe	Touch-Interaktion
Elektromagnetische Strahlung bzw. umfangreicher Metalleinsatz	Funktechnologien (z. B: NFC, RFID, WLAN)
Schlechte Lichtverhältnisse	Projektionen
	Kamera

Weitere spezielle Umgebungseinflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur, Vibration oder Staub sollten auf Komponentenebene mit den Herstellerspezifikationen abgeglichen werden.

Alle Technologien der Technologie- und Komponentendatenbank, welche sich nicht für den geplanten Einsatzbereich eignen, sollen nun nicht mehr betrachtet und aus dem Lösungsraum entnommen werden.

Auch alle Komponenten, die nicht für einen Einsatz geeignet sind, werden nicht weiter betrachtet. Dabei sind zusätzlich alle Technologien zu entfernen, die keiner Komponente mehr zugeordnet sind.

Um die Funktionsfähigkeit und Akzeptanz des Assistenzsystems sicherzustellen, wird empfohlen, den Ausschluss von Technologien und Komponenten auf Basis von Erprobungen durchzuführen. Ist dies nicht möglich, kann der Ausschluss alternativ erfahrungsbasiert umgesetzt werden.

7.5.3 Kostenbasierte Optimierung

An die eigentliche Technologie- und Komponentenauswahl für die einzelnen Assistenzsystemlösungen bestehen mehrere Anforderungen. Es sollen Technologien und Komponenten ausgewählt werden, die den Fähigkeitenbedarf der jeweiligen *Muss-* und *Kann-*Assistenzfunktionen decken. Dies muss für jede Lösung erfüllt sein. Bei der Auswahl soll zusätzlich eine binäre Auswahl der Komponenten erfolgen. Eine Komponente der anwendungsfallspezifischen Technologie- und Komponentendaten wird für die Lösung ausgewählt oder nicht ausgewählt. Eine gemeinsame Nutzung von Komponenten an mehreren Arbeitsplätzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten wird nicht betrachtet.

Für jede Assistenzsystemalternative soll weiterhin die kostenoptimale Lösung zur Umsetzung gefunden werden. Hierbei wird angenommen, dass sich der Nutzen eines Assistenzsystems durch die konzipierten Assistenzfunktionen ergibt und dieser mit allen Komponenten gleichermaßen realisiert werden kann, welche die notwendigen Fähigkeiten bereitstellen. Es soll daher eine kostenbasierte Optimierung für alle Lösungsalternativen erfolgen und die kostengünstigste Auswahl an Komponenten erzielt werden. Ein Kosten-Nutzen-Vergleich wird im darauffolgenden fünften Methodenschritt durchgeführt.

Das Optimierungsproblem zur Komponentenauswahl ist dabei wie folgt zu formulieren:

Zielfunktion:

$$\text{Min } K_n = \sum_{i=1}^{I_{\max}} k_i \cdot x_{i,n} \quad (4)$$

Nebenbedingungen für alle Fähigkeiten j :

$$f_{n,j}^b \leq \sum_{i=1}^{I_{\max}} f_{i,j}^a \cdot x_{i,n} \quad \forall j \quad (5)$$

Entscheidungsvariablen:

$$x_{i,n} \in \{0; 1\} \quad (6)$$

Die Zielfunktion (4) minimiert die Kosten eines Assistenzsystems n unter Berücksichtigung der Investitionskosten der einzelnen Komponenten. Die Nebenbedingungen (5) stellen sicher, dass jede Fähigkeit j vorhanden ist, sofern ein Bedarf besteht. Die Entscheidungsvariablen (6) sind binär, wobei ein Wert von 1 die Verwendung der Komponente i im Assistenzsystem n vor.

Im Optimierungsproblem werden folgende Laufindizes verwendet:

- $n \in N = \{1; \dots; N_{max}\}$: Laufindex für die konzipierten Assistenzsystemlösungen
- $i \in I = \{1; \dots; I_{max}\}$: Laufindex für die Komponenten der Technologie- und Komponentendatenbank
- $j \in J = \{1; \dots; J_{max}\}$: Laufindex für Fähigkeiten. Für die in Kapitel 6.4 ermittelten Fähigkeiten gilt: $J_{max} = 19$.

Die einzelnen Parameter des Optimierungsmodells lauten wie folgt:

- k_i : Kosten der Komponente i
- K_n : Kosten des Assistenzsystems n
- $f_{n,j}^b \in \{0; 1\}$: Binäre Beschreibung des Fähigkeitenbedarfs, der bei einem Wert von 1 den Bedarf von Fähigkeit j im Assistenzsystem n vorsieht. Der Fähigkeitenbedarf des Assistenzsystems n kann auch mittels des Vektors $F_n^b = \begin{pmatrix} f_{n,1}^b \\ \dots \\ f_{n,J_{max}}^b \end{pmatrix}$ beschrieben werden.
- $f_{i,j}^a \in \{0; 1\}$: Binäre Beschreibung des Fähigkeitenangebots, welches bei einem Wert von 1 das Angebot von Fähigkeit j in Komponente i vorsieht. Das Fähigkeitenangebot der Komponente i kann auch mittels des Vektors $F_i^a = \begin{pmatrix} f_{i,1}^a \\ \dots \\ f_{i,J_{max}}^a \end{pmatrix}$ beschrieben werden.

Das spezifizierte Optimierungsproblem besitzt eine lineare Zielfunktion und ist lediglich durch lineare Gleichungen und Ungleichungen eingeschränkt. Die Entscheidungsvariablen sind dabei ganzzahlig. Es handelt sich daher um ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem. Hierfür kann die optimale Lösung bspw. mittels eines Branch-and-Bound-Algorithmus gefunden werden (BURKARD 1972).

Die zur Lösung des Optimierungsproblems benötigten Parameter K_i sowie F_i^a sind Teil der Technologie- und Komponentendatenbank. Der Fähigkeitenbedarf

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

F_n^b entstammt dem dritten Methodenschritt zur Konzeptionierung der Assistenzfunktionen.

Gegenseitige Anforderungen von Komponenten werden durch das Optimierungsverfahren nicht berücksichtigt. Für den Fall, dass durch die kostenbasierte Optimierung keine Lösungen gefunden werden können, stehen zwei Optionen zur Verfügung. Zum einen kann die Marktrecherche ausgeweitet werden, um weitere Komponenten und Technologien zu identifizieren, mit der die Ausgangsbasis erweitert werden kann. Liefert der Algorithmus aufgrund fehlender technischer Umsetzbarkeit keine Lösung, so müssen die Erwartungen an das Assistenzsystem reduziert werden, indem einzelne Assistenzfunktionen entnommen bzw. Anforderungen aufgehoben werden.

7.5.4 Analyse ungenutzter Fähigkeiten

Für jede Lösung an Komponenten und Technologien, die durch die lineare Optimierung durchgeführt wurde, ist eine Analyse ungenutzter Fähigkeiten durchzuführen. Hiermit sind Fähigkeiten gemeint, die durch die ausgewählte Komponenten- und Technologieauswahl bereitgestellt werden, aber nicht durch konzipierte Assistenzfunktionen genutzt werden. Kann auf Basis ungenutzter Fähigkeiten eine weitere Assistenzfunktion konzipiert werden, so ist diese durch das Assistenzsystem umsetzbar, ohne dass zusätzliche Technologien oder Komponenten zu integrieren sind.

7.5.5 Budgetabgleich und Reduzierung von Alternativen

Für alle durch die kostenbasierte Optimierung generierten Assistenzsysteme können die Investitionskosten der Komponenten aufsummiert werden. Diese sind abzugleichen mit dem definierten Budget für das Assistenzsystem. Assistenzsysteme, die das vorgegebene Budget überschreiten, sollen aus der weiteren Betrachtung entfernt werden. Hierdurch kann die Zahl der alternativen Assistenzsystemlösungen reduziert werden, um möglichst eine geringe Zahl mit in den fünften Methodenschritt, die wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen, zu nehmen. Wird bei allen Assistenzsystemlösungen das Budget überschritten, so stehen zwei Optionen zur Verfügung. Durch einen Rücksprung in den dritten Methodenschritt können *Muss*-Anforderungen eliminiert werden, und so die Funktionalität und Kosten des Assistenzsystems reduziert werden. Alternativ kann der Budgetrahmen erhöht werden.

Neben dem Budgetabgleich zwischen den alternativen Lösungen und vorgegebenem Budget soll auch ein Kosten- und Komponentenvergleich zwischen den unterschiedlichen Assistenzsystemlösungen erfolgen. Ergeben sich zwei Lösungen mit identischer Komponentenauswahl, so ist die Assistenzsystemlösung mit der geringeren Anzahl an Assistenzfunktionen zu eliminieren, da hier ungenutzte Fähigkeiten bestehen und das Assistenzsystem bei Nutzung dieser Fähigkeiten der Vergleichslösung entspricht.

Weiterhin können im Rahmen dieses Methodenschritts auch Lösungen in Betracht gezogen werden, die mit geringen Mehrkosten weitere Assistenzfunktionen bereitstellen und so die Mehrkosten den Zusatznutzen offensichtlich tragen. Dies trifft beispielsweise dann zu, wenn eine weitere Assistenzfunktion bereits durch eine günstige Hardwarekomponente (z. B. Seriennummerndokumentation durch Barcodescanner) umgesetzt werden kann.

Ziel ist es, die Anzahl der alternativen Assistenzsystemlösungen auf maximal drei Alternativen zu reduzieren, um die Bewertungsaufwände in der anschließenden wirtschaftlichen Systembewertung handhabbar zu halten.

7.6 Wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen

7.6.1 Übersicht

Im fünften Methodenschritt wird für die reduzierte Anzahl an Assistenzsystemalternativen, für die eine Komponentenauswahl und Kostenbewertung vorliegt, eine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt sowie eine Auswahl für das zu implementierende System getroffen (Abbildung 31). Bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung kognitiver Assistenzsysteme besteht die Schwierigkeit darin, sowohl quantifizierbare als auch nicht quantifizierbare Nutzen bei der Investitionsentscheidung zu berücksichtigen. Um diese Betrachtung zu ermöglichen, werden zuerst quantitativ bewertbare sowie qualitative Nutzen für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt, die in den Betrachtungsrahmen fallen sollen. Quantitative Nutzen werden mit den berechneten Investitionskosten sowie den laufenden Kosten eines Assistenzsystems in eine wirtschaftliche Kennzahl überführt. Der qualitative Nutzen soll mittels einer Nutzwertanalyse bewertet werden. In einer Matrix werden beide Nutzen für alle Assistenzsystemalternativen gegenübergestellt, um eine weitere Auswahl der Alternativen und schließlich eine Entscheidung für ein System zur Implementierung herbeizuführen.

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage




Input 	Ablauf 	Output 
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduzierte Assistenzsystemalternativen ▪ Kostenbewertung pro Assistenzsystemalternative 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Auswahl quantitativer und qualitativer Kriterien 2. Bewertung einer wirtschaftlichen Kennzahl 3. Bewertung des qualitativen Nutzens 4. Systemvergleich und-auswahl 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirtschaftlichkeitsbewertung pro Assistenzsystem ▪ Systemauswahl zur Implementierung

Abbildung 31: Übersicht über den fünften Methodenschritt
"Wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen"

7.6.2 Quantitative Wirtschaftlichkeitsbewertung

Für die quantitative Wirtschaftlichkeitsbewertung sind die relevanten Auswirkungen des kognitiven Assistenzsystems auf ein- und ausgehende Geldströme des Unternehmens zu quantifizieren. Umsatzerhöhung und Kostensenkungen wirken sich dabei positiv, während sich Umsatzsenkung und steigende Kosten negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Assistenzsystems auswirken.

Im Rahmen von Expertenworkshops wurden relevante Geldströme zusammengetragen, die bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Assistenzsystemen relevant sind. Diese Cashflows werden im Folgenden dargestellt.

Als für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevante positive Veränderungen des Cashflows wurden die folgenden Elemente identifiziert (Tabelle 24).

Tabelle 24: Positive Veränderung des Cashflows durch Assistenzsysteme

Geldstrom	Potenzial	Bewertungsverfahren
Umsatz	Umsatzerhöhung durch Kapazitätserhöhung aufgrund von Produktivitätssteigerung	Workshop zur Bewertung von Effizienzsteigerungen und zusätzlichen Aufträgen
Nacharbeitskosten	Senkung von Stückkosten durch die Vermeidung von Nacharbeitskosten	Bewertung bisheriger Nacharbeitsaufwände und Schätzung von Reduzierungspotenzialen
Qualifizierungskosten	Kostensenkung durch eigenständige und schnellere Einarbeitung neuer Mitarbeiter	Bewertung bisheriger Qualifikationskosten und Schätzung von Senkungspotenzialen

7.6 Wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen

Material	Senkung von Ausschusskosten durch Fehlvermeidung	Recherche der Materialbeschaffungskosten und Schätzung der Reduzierung der Ausschussrate
Reklamationen	Senkung von Reklamationskosten und Rückrufaktionen	Berechnung von Reklamationskosten der Vergangenheit und Schätzung des Reduzierungspotenzials
Indirektes Personal	Kostensenkung in Arbeitsvorbereitung durch effizientere Verwaltung von Montageanleitungen	Schätzung von Personalaufwänden bei repräsentativen Aufgaben (z. B. Veränderung in der Prozessbeschreibung an allen Arbeitsplätzen)

Als für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevante negative Veränderungen des Cashflows wurden die folgenden Elemente identifiziert (Tabelle 25).

Tabelle 25: Negative Veränderung des Cashflows durch Assistenzsysteme

Geldstrom	Potenzial	Bewertungsverfahren
Einmalige Kosten des Assistenzsystems	Einmalige Kosten durch Beschaffung von Hardwarekomponenten des Assistenzsystems	Technologie- und Komponentendatenbank bzw. Angebots-einholung
Einmalige Integrationskosten	Einmalige Kosten durch externe Softwareanbieter für die Programmierung von Schnittstellen	Angebotseinholung und Abgleich mit vergleichbaren Beauftragungen der Vergangenheit
Laufende Kosten des Assistenzsystems	Laufende Kosten für Lizenzen, Updates, Batterien, Verbrauchsmaterial und externe Wartung	Technologie- und Komponentendatenbank bzw. Angebots-einholung
Zinskosten	Kosten für benötigtes Investitionskapital für das Assistenzsystem	Nutzung unternehmensspezifischer Kapitalkosten
Qualifikationskosten	Einmalige Trainings und Integration bei Einarbeitung neuer Mitarbeiter	Erstellung eines Projektplans mit Key Users für das zu integrierende System und Bewertung mit Personalkostensätzen
Instandhaltung des Assistenzsystems	Regelmäßige Kosten in Montage und IT für Fehlerbehebung sowie Installation von Updates und Pflegen von Inhalten	Schätzung des Aufwands und Bewertung mit Personalkostensätzen

Energiekosten finden sich nicht in den Übersichten, da sowohl die Einsparungen von Energiekosten in der Montage als auch die zusätzlichen Energiekosten durch kognitive Assistenzsysteme als vernachlässigbar angesehen werden.

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Für die quantitative Wirtschaftlichkeitsbewertung existieren in der Literatur zahlreiche statische sowie dynamische Methoden der Investitionsrechnung (MÜLLER 2006). Verbreitete statische Verfahren sind Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung sowie die statische Amortisationsrechnung. Zu den verbreiteten dynamischen Methoden zählen u.a. die Kapitalwertmethode sowie die interne Zinsfußmethode (MÜLLER 2006). Ist durch das Controlling des Anwenders der Methode eine Bewertungsmethode vorgegeben, so soll diese genutzt werden, um eine schnelle Entscheidung für die Implementierung des Assistenzsystems zu erreichen. Ist keine Methode vorgegeben, soll eine dynamische Methode genutzt werden, um die Wirtschaftlichkeit zu bewerten, um auch Zinseffekte mit einzuberechnen. Hierbei wird die Kapitalwertmethode empfohlen, die auf Basis der Tabellen 24 und 25 durchgeführt werden kann.

Sofern für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Werte geschätzt werden müssen, sollten zur Erhöhung der Genauigkeit spezifische Schätzmethode angewandt werden. Auf Basis unterschiedlicher Schätzmethode (JAKOBY 2015) wurden folgende Methoden für die Wirtschaftlichkeitsbewertung kognitiver Assistenzsysteme als besonders geeignet eingestuft:

- **Intuitives Schätzen mit mehreren Personen (JAKOBY 2015):**
Beim intuitiven Schätzen mit mehreren Personen wird eine Schätzaufgabe (z. B. Prozentuale Reduzierung der Montagefehler bei einem Einsatz eines Pick-by-Light-Systems) mehreren Experten auferlegt, die unabhängig eine Bewertung durchführen. Zu diesem Expertenkreis sollten Projektleitung, Einkauf, Produktion sowie IT hinzugezogen werden. Aus den unterschiedlichen Werten wird im Anschluss ein Mittelwert berechnet. Bei einer größeren Runde an Experten kann vor der Mittelwertbildung auch der höchste und niedrigste Schätzwert entfernt werden, um eine Erhöhung der Genauigkeit durch Entfernen von Ausreißern zu erzielen. Bei mehreren Schätzungen können zudem Standardabweichung bzw. Varianz genutzt werden, um die Schätzungen mit den höchsten Abweichungen vertiefter in der Expertenrunde zu diskutieren.
- **Vergleichendes Schätzen (JAKOBY 2015):**
Beim vergleichenden Schätzen wird ein ähnlicher Fall analysiert und Messwerte des Vergleichsfalls als Schätzwert übernommen. Dies können Implementierungen von Assistenzsystemen in anderen Montagebereichen oder anderen Unternehmen sein. Liegen Referenzwerte von Anbietern kognitiver Assistenzsysteme vor, so sind diese aufgrund von Verkaufsinteressen mit Vorsicht zu betrachten.

Ist für einen Kosten- oder Nutzenfaktor keine Schätzung aufgrund fehlender Datengrundlage möglich, so können diese als zusätzliche Aspekte in die qualitative Wirtschaftlichkeitsbewertung übernommen werden.

7.6.3 Qualitative Wirtschaftlichkeitsbewertung

Zahlreiche Auswirkungen der Digitalisierung können nicht direkt quantifiziert werden, sind aber trotzdem im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen. Daher wird zusätzlich zu einer wirtschaftlichen Kennzahl ein qualitativer Nutzwert berechnet, der als zweite Dimension der Wirtschaftlichkeitsbewertung vor allem strategische Aspekte berücksichtigt.

Hierbei sollen Chancen und Risiken in den Kategorien Mensch, Technik sowie Organisation betrachtet werden (Tabelle 26). Die sog. MTO-Analyse dient der Analyse von Arbeitstätigkeiten und Arbeitssystemen im Kontext soziotechnischer Systeme (ULICH 2011).

Tabelle 26: Qualitative Aspekte bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung kognitiver Assistenzsysteme

	Chancen	Risiken
Mensch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kundenzufriedenheit ▪ Dialog mit Mitarbeitern ▪ Mitarbeiterzufriedenheit ▪ Einfluss auf Arbeitsmethoden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höherer Qualifikationsbedarf
Technik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualitätserhöhung ▪ Senkung des Dokumentationsaufwands ▪ Höhere Datenverfügbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Integrationsrisiken
Organisation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompetenzaufbau ▪ Flexibilitätserhöhung ▪ Steigerung der Innovationskraft 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verlust von Know-how

Die Bewertung des qualitativen Nutzens wird auf Basis des analytisch-hierarchischen Prozesses (AHP) (SAATY & VARGAS 2012) durchgeführt. Dieser basiert wiederum auf der Nutzwertanalyse und erweitert diese um einen paarweisen Vergleich der Bewertungskriterien. Der AHP eignet sich, da Gewichtungen unternehmensindividuell und durch mehrere Personen gebildet werden können.

Zunächst soll eine Auswahl der für den jeweiligen Anwender relevanten Bewertungskriterien auf Basis von Tabelle 26, ggf. eigenen Ergänzungen sowie nicht

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

quantifizierbaren Aspekten der vorausgegangenen quantitativen Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgen. Diese Kriterien werden in einem Workshop durch paarweisen Vergleich gewichtet. Die Alternativen für die Nutzwertanalyse bilden die einzelnen kognitiven Assistenzsystemlösungen. Die Erfüllung der Kriterien wird pro Assistenzsystem in einem Workshop auf einer Skala von 0 bis 10 bewertet. Bei diesem Workshop ist auf eine möglichst breite Besetzung der Teilnehmer zu achten, um einerseits einen breiten Rückhalt durch unterschiedliche Multiplikatoren zu ermöglichen. Andererseits dient eine breite Besetzung auch der Qualität der Bewertungsergebnisse, da mit unterschiedlichen Fachbereichen (z. B. IT, Vertrieb, HR, Montage) Bewertungen fundierter getroffen werden können. Mittels der durch den paarweisen Vergleich bestimmten Gewichtungen und der jeweiligen Erfüllung der Kriterien kann für jede Assistenzsystemalternative ein Nutzwert berechnet werden.

7.6.4 Systemvergleich und -auswahl

Aufgrund der Bewertung der alternativen Assistenzsystemlösungen auf Basis einer quantitativen Wirtschaftlichkeitskennzahl und einem Nutzerwert, der qualitative Aspekte abdeckt, kann mit Hilfe der zweidimensionalen Bewertung keine direkte Rangliste ermittelt werden. Stattdessen soll durch eine zweidimensionale Übersicht ein Vergleich der alternativen Systeme durchgeführt werden (Abbildung 32). Ist die wirtschaftliche Kennzahl bei geringeren Werten vorteilhafter (z. B. Amortisationszeit), so soll diese invers aufgetragen werden. Ähnlich wie bei der sog. BCG-Matrix (OLBRICH 2006) oder beim Eisenhower-Prinzip (JAKOBY 2015) soll die zweidimensionale Bewertung durch eine Unterteilung in vier unterschiedliche Felder eingeteilt werden (Abbildung 32).

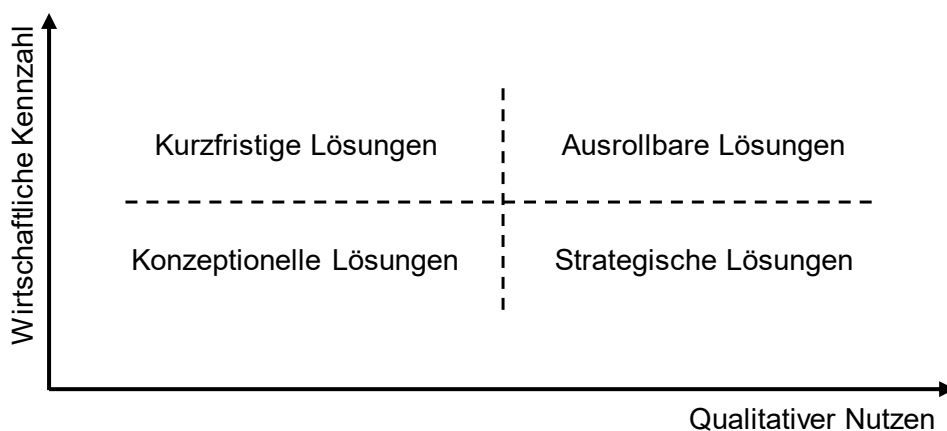


Abbildung 32: Kategorisierung von Assistenzsystemlösungen

Assistenzsystemlösungen können in folgende vier Kategorien eingeteilt werden:

- *Konzeptionelle Lösungen:*
Assistenzsysteme, die von anderen Lösungen mit besserer wirtschaftlicher Kennzahl sowie qualitativem Nutzen überragt werden, sollten nicht in die Umsetzung gelangen, sondern im Konzeptstadium verbleiben bzw. bei neuerer Technologie überarbeitet werden.
- *Kurzfristige Lösungen:*
Liefert ein Assistenzsystem bereits eine hohe direkt bewertbare Wirtschaftlichkeit, so kann dieses kurzfristig umgesetzt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, ob das zu unterstützende Produkt die Amortisationszeit des Assistenzsystems abdeckt bzw. ob das Assistenzsystem auch für andere Produkte weitergenutzt werden kann. Es besteht das Risiko, dass das Assistenzsystem nur für ein spezifisches Produkt nutzbar ist.
- *Strategische Lösungen:*
Ist für ein Assistenzsystem ein hoher qualitativer Nutzen, jedoch eine geringe direkte Wirtschaftlichkeit ermittelt worden, so ist zu empfehlen das Assistenzsystem als Demonstrator bzw. als Testarbeitsplatz in Laborumgebung aufzubauen. Hier können Erfahrungen gesammelt werden, Innovationen vermarktet werden und die direkten Nutzen durch Experimente genauer quantifiziert werden. Mit dem zusätzlich generierten Wissen sowie sinkenden Kosten neuer Technologien kann ggf. in Zukunft eine Ausrollung des Assistenzsystems auf Produktivarbeitsplätze erfolgen.
- *Ausrollbare Lösungen:*
Ist für ein Assistenzsystem eine wirtschaftliche Kennzahl ermittelt worden, die die Investition direkt rechtfertigt und zudem ein hoher qualitativer Nutzen bestimmt worden, so ist zu empfehlen, das Assistenzsystem zeitnah auf alle relevanten Produktivarbeitsplätze auszurollen. Die Amortisation der Investition ist gesichert. Zudem bestehen zahlreiche strategische Potenziale, die eine zukünftige Weiterentwicklung des Systems ermöglichen. Um Risiken im Rollout zu minimieren, wird trotzdem empfohlen, an einem Pilotarbeitsplatz Erfahrungen zu sammeln, falls eine erstmalige Implementierung von kognitiven Assistenzsystemen im Unternehmen bevorsteht.

Die Vorteile der zweidimensionalen Bewertung liegen darin, dass eine wirtschaftliche Kennzahl berechnet werden kann und trotzdem nicht-quantifizierbare Aspekte mit in die Bewertung einfließen. Der Nachteil besteht darin, dass nicht in jedem Fall ein eindeutiges Optimum gefunden werden kann.

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Der beispielhaft abgebildete Vergleich mit vier Alternativen (Abbildung 33) macht jedoch deutlich, dass trotz der zweidimensionalen Bewertung eine Reduzierung der Alternativen durchgeführt werden kann. Im gezeigten Beispiel werden die ersten beiden Alternativen durch die dritte Alternative dominiert, da die dritte Alternative in beiden Dimensionen jeweils mit einer besseren Kennzahl bewertet worden ist. Eine Entscheidung zwischen der dritten und vierten Alternative muss durch eine weitere Analyse getroffen werden.

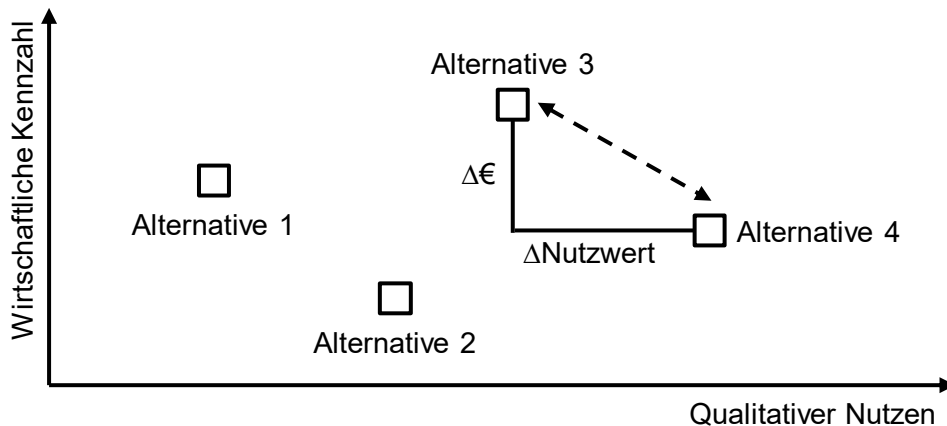


Abbildung 33: Zweidimensionaler Vergleich alternativer Assistenzsystemlösungen

Für die Auswahl einer Alternative bei nicht eindeutigem Ergebnis der zweidimensionalen Bewertung existieren folgende Optionen:

- Ist die Differenz auf einer der beiden Dimensionen vernachlässigbar gering, so existiert zwar mathematisch kein Optimum, aber es kann trotzdem ein finales System für die Implementierung ausgewählt werden.
- Es erfolgt eine eindeutige Entscheidung (bspw. durch die Geschäftsführung) auf Basis des unternehmerischen Risikos.
- Beide Systeme werden unabhängig voneinander erprobt und eine zweite Bewertung auf Basis genauerer Erfahrungswerte durchgeführt.
- Bauen die beiden Systeme aufeinander auf, so kann eine Implementierung der niedrigeren Ausbaustufe erfolgen und die höhere Ausbaustufe testweise implementiert werden. Im Anschluss kann über ein Rollout der höheren Ausbaustufe entschieden werden.

Ähnlich einem Navigationssystem, das eine Zeit-, Weg- oder Umweltoptimale Lösung ermitteln kann, können auch auf Basis der Methode verschiedene Lösungen

hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Nutzwert entstehen. Statt einer ungenauen Verrechnung von Wirtschaftlichkeitskennzahl und Nutzwert wird stattdessen eine bewusste Entscheidung für das zu implementierende System getroffen.

7.7 Fazit

Auf Basis des in Kapitel 5 entwickelten Systemmodells und der in Kapitel 6 aufgezeigten Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen wurde in Kapitel 7 die Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme vorgestellt.

Die Gestaltung der Methode erfolgte in Anlehnung an den Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (DIN EN ISO 9241-210). Ausgehend von einem industriellen Montagearbeitsplatz kann mittels der fünf entwickelten Methodenschritte ein Assistenzsystem konzipiert werden.

Durch die Formulierung von Assistenzfunktionen ermöglicht die Methode eine technologiefreie Beschreibung von Assistenzsystemen, die deren Nutzen für den Montageprozess und nicht den Technologieeinsatz in den Vordergrund stellt. Um die Akzeptanz zu erhöhen, erfolgt eine frühestmögliche Einbindung der zukünftigen Nutzer.

Im ersten Methodenschritt der Bedarfsanalyse wird der Montageprozess in einzelne Prozessschritte unterteilt und die Wahrnehmungs-, Durchführungs- und Dokumentationskomplexität bewertet. Diese Bewertung ermöglicht eine Zuordnung der Grundtypen für Assistenzfunktionen.

Anschließend werden im Rahmen der partizipativen Technologievorauswahl Erprobungen mittels unterschiedlicher Technologien geplant. Die Durchführung soll am zukünftigen Einsatzort stattfinden, um Technologien unter Realbedingungen zu erproben und einen möglichst breiten Kommunikationseffekt zu erzielen.

Im dritten Methodenschritt werden spezifische Assistenzfunktionen formuliert, deren Fähigkeiten spezifiziert und eine Priorisierung vorgenommen. Hiermit entstehen alternative Konzepte kognitiver Assistenzsysteme, die im weiteren Verlauf der Methode detailliert werden. Zeitgleich findet aber auch eine Fokussierung statt, indem die Anzahl der alternativen Systeme eingegrenzt werden.

Auf Basis der Erprobungsergebnisse wird die allgemeine Technologie- und Komponentendatenbank anwendungsfallspezifisch angepasst. Auf Grundlage einer Lö-

7 Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage

sungsmenge für den Anwendungsfall geeigneter Komponenten erfolgt für jede alternative Assistenzsystemlösung eine kostenbasierte Optimierung, die eine Zuordnung von konkreten Komponenten für das jeweilige Assistenzsystem ermöglicht.

Mit der Bewertung der Wirtschaftlichkeit im fünften Methodenschritt erfolgt schließlich die Auswahl für ein Assistenzsystem. Da bei Digitalisierungsprojekten viele Nutzen zwar relevant, aber nicht direkt quantifizierbar sind, wird die wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen auf Basis von zwei Dimensionen durchgeführt. In einer quantitativen Wirtschaftlichkeitsbewertung wird eine wirtschaftliche Kennzahl berechnet, die alle quantifizierbaren Nutzen enthält. Für qualitative Nutzen wird, angelehnt an den AHP, ein Nutzwert bestimmt. Auf Basis dieser beiden Dimensionen wird schließlich die Entscheidung für ein Assistenzsystem getroffen und eine Beschaffung veranlasst.

Die Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme demonstriert die Relevanz von Prozessverständnis der Montage, IT-Technologien sowie Methoden zur Investitionsentscheidung. Zusätzlich sind juristische Aspekte zu betrachten, die u.a. Mitbestimmungsrechte der Arbeitnehmer und den Datenschutz umfassen.

Im anschließenden Kapitel 8 erfolgt eine Darstellung der prototypischen Anwendung der Methode und Validierung. In einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung werden die Aufwände zur Anwendung der Methode abgeschätzt.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

8.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel wird die industrielle Umsetzbarkeit der entwickelten Methode thematisiert. Hierzu erfolgt in Abschnitt 8.2 die Darstellung des mobilen Montagearbeitsplatzes, der für die partizipative Technologievorauswahl gemäß Abschnitt 7.3 genutzt wird. Es wird auf den dazugehörigen Fragebogen zur Akzeptanzbewertung eingegangen und der Aufbau der Technologie- und Komponentendatenbank präsentiert. Schließlich wird das Optimierungstool zur kostenminimalen Komponentenauswahl für unterschiedliche Systemalternativen vorgestellt.

In Abschnitt 8.3 wird im Rahmen der Validierung die Durchführung der Methode an einem industriellen Anwendungsfall in der Montage von Planetengetrieben gezeigt. Hierbei werden alle Schritte der Methode durchlaufen und das finale kognitive Assistenzsystem veranschaulicht.

Im Abschnitt 8.4 wird die industrielle Anwendbarkeit der Methode analysiert und hinsichtlich technisch-wirtschaftlichen Aspekten bewertet. Hierfür wird der Erfüllungsgrad der in Kapitel 4 gesetzten Anforderungen überprüft. Eine Kosten-Nutzen-Analyse beurteilt die Wirtschaftlichkeit der Methode und zeigt, ab wann sich der Demonstrationsarbeitsplatz für die partizipative Technologieauswahl amortisiert. Das Kapitel schließt mit einem Fazit in Abschnitt 8.5.

8.2 Technische Umsetzung

8.2.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Abschnitts werden die technischen Hilfsmittel der einzelnen Methodenschritte dargestellt (Tabelle 27). Auf die benötigten Kalkulationsvorlagen wird nicht weiter eingegangen, da deren Funktionsweise bereits durch die Darstellung der Methode in Kapitel 5 ausreichend beschrieben wurde. Die für den zweiten Methodenschritt relevanten Fragebögen finden sich im Anhang dieser Arbeit.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Tabelle 27: Technische Hilfsmittel zur Umsetzung der Methode

Methodenschritt	Benötigte Hilfsmittel
Bedarfsanalyse	<ul style="list-style-type: none">▪ Tabellenkalkulation
Partizipative Technologievorauswahl	<ul style="list-style-type: none">▪ Mobiler Montagearbeitsplatz▪ Fragebögen
Konzeptionierung von Assistenzfunktionen	<ul style="list-style-type: none">▪ Tabellenkalkulation
Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen	<ul style="list-style-type: none">▪ Technologie- und Komponentendatenbank▪ Optimierungstool zur Komponentenauswahl
Wirtschaftliche Bewertung von Assistenzsystemen	<ul style="list-style-type: none">▪ Kalkulationsvorlage▪ Diagramm zur zweidimensionalen Visualisierung

Alle weiteren benötigten Hilfsmittel werden in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt. Diese umfassen den mobilen Montagearbeitsplatz für die partizipative Technologievorauswahl sowie die Technologie- und Komponentendatenbank und das Optimierungstool zur Komponentenauswahl für die Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen.

8.2.2 Mobiler Montagearbeitsplatz

Zur Durchführung der partizipativen Technologievorauswahl wurde ein universeller Arbeitsplatz für die manuelle Montage aufgebaut (Abbildung 34) (SOCHOR ET AL. 2019B). Dieser Arbeitsplatz zeichnet sich durch folgende Punkte aus.

- Elektrische Höhenverstellung
- Universelles Werkzeug
- LED-Beleuchtung
- 30 Sichtlagerkästen für Material
- Befestigung auf Rollen

Der Montagetisch ist mobil, kann vor Ort unter den jeweiligen Rahmenbedingungen erprobt werden und erlaubt die schnelle Umrüstung auf ein neues Produkt.

Bei der partizipativen Technologieauswahl sind bessere Ergebnisse zu erwarten, wenn die Teilnehmer ein ihnen bereits bekanntes Produkt montieren und nicht ein Beispielprodukt des mobilen Montagearbeitsplatzes. So kann der Fokus auf die Gestaltung des Assistenzsystems gelegt werden und nicht auf den Montageprozess

eines unbekanntes Produkts. Es wird daher empfohlen, den mobilen Montagearbeitsplatz auf das jeweilige Produkt zu rüsten, für das ein kognitives Assistenzsystem eingeführt werden soll. Dazu müssen die jeweiligen Einzelteile, Baugruppen und Werkzeuge bereitgestellt und Prozessabläufe in der IT-Plattform des mobilen Montagearbeitsplatzes angelegt werden.

Sollen Arbeitsplätze mit kognitivem Assistenzsystem für ein neues Produkt entwickelt werden, für das Einzelteile und Baugruppen noch nicht physisch bereitliegen oder bestehende andere Gründe, die eine Verwendung des zukünftigen Produktes am mobilen Montagearbeitsplatz verhindern, so kann ein bereits vorhandenes Beispielprodukt genutzt werden. Hierfür stehen am mobilen Montagearbeitsplatz ein Getriebe und eine Kupplung als alternative variantenreiche Produkte zur Verfügung.



Abbildung 34: Frontalansicht des mobilen Montagearbeitsplatzes am Fraunhofer IGCV

Am mobilen Montagearbeitsplatz sind zahlreiche Komponenten kognitiver Assistenzsysteme integriert (Tabelle 28). Der Schwerpunkt der Erprobung liegt bei den Fähigkeiten, die den Informationsfluss zwischen kognitivem Assistenzsystem und den Montagemitarbeitern beschreiben. Fähigkeiten zwischen Arbeitsplatz oder IT-Systemen und dem kognitiven Assistenzsystem sind weitestgehend unabhängig

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

von den zukünftigen Nutzern und fallen nicht in die Erprobung. Zu Erprobungszwecken sind neun verschiedene Komponenten mit zehn Technologien am Arbeitsplatz angebracht, die sechs verschiedene Fähigkeiten ermöglichen. Der Montagearbeitsplatz ist als offenes und flexibles System gestaltet. Bei neueren technischen Entwicklungen sollen diese zeitnah integriert werden, um den Arbeitsplatz auf dem aktuellen Stand der Technik zu halten.

Tabelle 28: Komponenten, Technologien und Fähigkeiten kognitiver Assistenzsysteme am mobilen Montagearbeitsplatz

Komponente	Technologien	Fähigkeiten
Gestensteuerungsarmband (Unterarm)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestensteuerung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Binäre Eingabe (#4)
Gestensteuerungsarmband (Handgelenk)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestensteuerung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Binäre Eingabe (#4)
Stationäre Gestensteuerung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestensteuerung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Binäre Eingabe (#4)
Drückknöpfe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tasteneingabe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Binäre Eingabe (#4)
Intelligenter Datenhandschuh	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vibration ▪ Akustisches Feedback ▪ Barcodescan 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Warnung (#1) ▪ Binäre Eingabe (#4)
Touchscreen-Monitor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Displayanzeige ▪ Touch-Eingabe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Warnung (#1) ▪ Bereitstellung auftragsspezifischer Informationen (#2) ▪ Detaillierte Beschreibung des Montagevorgangs (#3) ▪ Binäre Eingabe (#4) ▪ Textuelle Eingabe (#5) ▪ Mitarbeiteridentifikation (#6)
Beamer	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projektion 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Warnung (#1) ▪ Bereitstellung auftragsspezifischer Informationen (#2) ▪ Detaillierte Beschreibung des Montagevorgangs (#3)
Lautsprecher	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sprachausgabe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Warnung (#1) ▪ Bereitstellung auftragsspezifischer Informationen (#2)
Headset	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sprachausgabe ▪ Spracheingabe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Warnung (#1) ▪ Bereitstellung auftragsspezifischer Informationen (#2) ▪ Binäre Eingabe (#4) ▪ Textuelle Eingabe (#5)

Ein Teil der eingesetzten Gestensteuerungsarmbänder bietet laut Hersteller die Möglichkeit, Texteingaben durch das Schreiben von Buchstaben mittels Gesten zu erfassen. Diese Fähigkeit wurde wegen noch unzureichender Prozesssicherheit und Effizienz hier nicht berücksichtigt. Die Kombination von Projektor, Touchscreen sowie diverse Eingabekomponenten decken unterschiedliche Anwendungsfälle in der Produktion ab. Kommen Schmierstoffe zum Einsatz, existieren für die Ein- und Ausgabe von Informationen unterschiedliche Komponenten und Technologien, die erprobt werden können.

8.2.3 Technologie- und Komponentendatenbank

Für die Technologie- und Komponentendatenbank wurde ein Softwaretool aufgebaut, welches aus zwei Modulen, einem allgemeinen und einem anwendungsfall-spezifischen Modul besteht (Abbildung 35).

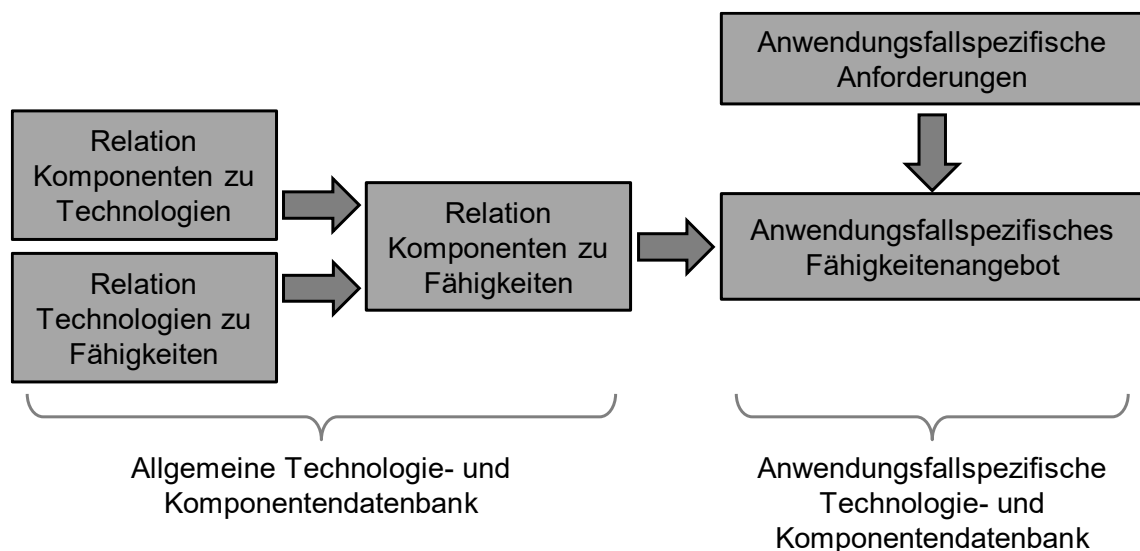


Abbildung 35: Aufbau der Technologie- und Komponentendatenbank

Die allgemeine Technologie- und Komponentendatenbank besteht aus den folgenden Elementen, die jeweils als ein Tabellenblatt implementiert wurden:

- *Relation Komponenten zu Technologien*

In dieser Übersicht sind alle Komponenten für Assistenzsysteme auf Basis einer Marktrecherche angelegt. Zusätzlich können die im Systemmodell für kognitive Assistenzsysteme (Kapitel 5) spezifizierten Attribute gepflegt werden. Hierbei sind vor allem die Investitionskosten relevant. Diese Werte gehen im folgenden Abschnitt als Parameter in das Optimierungstool ein (Parameter K_i). Die Komponentenliste wird initial erstellt. Für den Erfolg

der Methode ist eine regelmäßige Aktualisierung erforderlich. Diese Aktualisierung besteht aus den folgenden Tätigkeiten:

- Aufnahme neuer Komponenten in die Komponentenliste
- Entnahme nicht mehr verfügbarer Komponenten aus der Komponentenliste
- Aktualisierung von Kostenparametern bei Erhöhung bzw. Senkung
- *Relation Technologien zu Fähigkeiten*
In dieser Übersicht sind alle Technologien spezifiziert, die von den Komponenten der Datenbank genutzt werden. Auch hier können relevante Attribute (z. B. Technology Readiness Level) gepflegt werden. Bei der Technologieliste ist ebenfalls eine regelmäßige Aktualisierung durchzuführen:
 - Aufnahme weiterer Technologien bei Aufnahme neuer Komponenten mit bisher nicht vorhandenen Technologien
 - Aktualisierung von Parametern bei neuen Forschungsergebnissen (z. B. Erhöhung des Technology Readiness Levels)
- *Relation Komponenten zu Fähigkeiten*
Auf Basis der ersten beiden Relationen kann direkt das Fähigkeitenangebot der Komponenten bestimmt werden.

Die allgemeine Technologie- und Komponentendatenbank stellt wesentliche Stammdaten der Methode bereit. Diese müssen regelmäßig gepflegt werden, sind aber von der Durchführung der Methode unabhängig. Um die anwendungsfall-spezifische Technologie- und Komponentendatenbank zu erstellen, sind weitere Daten notwendig, die jeweils als ein Tabellenblatt implementiert werden:

- *Anwendungsfall-spezifische Anforderungen*
Bei der Durchführung der Methode werden zusätzlich anwendungsfall-spezifische Anforderungen gesammelt. Diese können den Ausschluss von Technologien oder Komponenten zur Folge haben.
- *Anwendungsfall-spezifisches Fähigkeitenangebot*
Die anwendungsfall-spezifischen Anforderungen führen, wie in Abschnitt 7.5.2 beschrieben, zu einer Anpassung der Technologie- und Komponentendatenbank. Daraus resultiert eine Übersicht an Komponenten, die für den Anwendungsfall geeignet sind, sowie deren Fähigkeiten, die ausschließlich für diesen Anwendungsfall geeigneten Technologien entstammen (Parameter F_i^a).

8.2.4 Optimierungstool zur Komponentenauswahl

Zur Umsetzung der kostenbasierten Optimierung für die Komponentenauswahl wurde ebenfalls ein softwaregestütztes Tool entwickelt (Abbildung 36). Dieses Tool kommt für jede Assistenzsystemalternative n separat zum Einsatz.

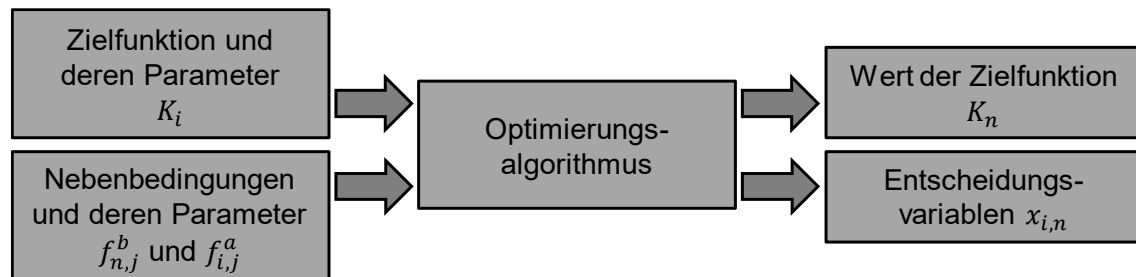


Abbildung 36: Aufbau des Optimierungstools zur Komponentenauswahl

Die Eingangsdaten für den Optimierungsalgorithmus wurden wie folgt umgesetzt:

- **Komponentenkosten k_i**
Die benötigten Komponentenkosten werden aus der reduzierten Komponentenliste wie in Abschnitt 8.2.3 beschrieben entnommen.
- **Fähigkeitenbedarfe $f_{n,j}^b$**
Die Fähigkeitenbedarfe werden pro Assistenzsystem auf Basis der konzipierten Assistenzfunktionen ermittelt. Sie werden untereinander in einer Spalte als Vektor F_n^b angegeben, der den Fähigkeitenbedarf des Assistenzsystems n beschreibt.
- **Fähigkeitenangebote $f_{i,j}^a$**
Die Fähigkeitenangebote werden wie in Abschnitt 8.2.3 pro Komponente i spezifiziert. Hierin sind nur Fähigkeiten enthalten, die für den Anwendungsfall nutzbare Technologien bereitstellen. Sie werden untereinander in einer Spalte als Vektor F_n^a angegeben, der den Fähigkeitenbedarf des Assistenzsystems n beschreibt.

Der Optimierungsalgorithmus selbst wurde mittels des Excel Solvers realisiert. Der Excel Solver ist ein Erweiterungsmodul, mit welchem Optimierungsprobleme innerhalb der Tabellenkalkulationssoftware gelöst werden können. Das hat den Vorteil, dass die Methode ohne zusätzliche Beschaffung von Spezialsoftware umgesetzt werden kann. Es erfolgten folgende Einstellungen:

- **Wert der Zielfunktion K_n**
Die Zielfunktion selbst wurde in der Zelle des Werts der Zielfunktion implementiert und im Solver die Minimierung dieses Werts eingestellt.

- Entscheidungsvariablen $x_{i,n}$

Die Entscheidung über eine Verwendung der einzelnen Komponenten i wurde als Spaltenvektor der Länge I_{max} realisiert, dessen Länge die Anzahl der für den Anwendungsfall nutzbaren Komponenten beschreibt. Die Entscheidungsvariablen wurden im Solver als die zu ändernden Variablenzellen referenziert und deren Nichtnegativität gesetzt. Zudem sind sie in den Nebenbedingungen zur Bereitstellung der benötigten Fähigkeiten enthalten.

Die Rechenzeit für das Optimierungsproblem ist bei heutigen Prozessortechnologien und Algorithmen vernachlässigbar. Dadurch, dass der Algorithmus für mehrere Systemalternativen separat durchgeführt wird, erfolgt die finale Systemauswahl nicht allein auf Basis einer Kostenminimierung, sondern auch auf der Basis qualitativer Nutzenaspekte.

8.3 Validierung

8.3.1 Vorgehensweise der Validierung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit ist zwischen der Entwicklung der Methode und deren Validierung zu differenzieren (Abbildung 37). Die Entwicklung der Methode fand an verschiedenen Montagearbeitsplätzen in der Lernfabrik für vernetzte Produktion statt (MERKEL ET AL. 2017C, 2018B, 2019B) (Abbildung 38). Dort stehen unterschiedliche variantenreiche Produkte zur Verfügung, für die der Einführungsprozess erprobt und weiterentwickelt werden kann. Die Anwendung der Methode hatte zum Ziel, benötigte Werkzeuge und Hilfsmittel für die Methoden zu erproben und schließlich Erfahrungswissen zu generieren, um dieses in die entwickelte Methode einfließen zu lassen.

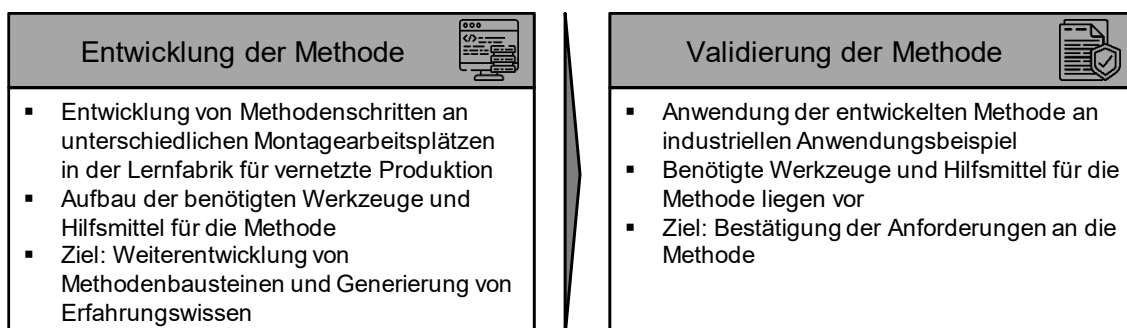


Abbildung 37: Abgrenzung von Entwicklungs- und Validierungsphase

Die Validierung der Methode erfolgt nach Abschluss deren Entwicklung. Eine Validierung ist nach DIN EN ISO 9000 definiert als die „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind“ (DIN EN ISO 9000, S. 31). Bei der Validierung im Rahmen dieser Arbeit wird die final entwickelte Methode an einem neuen Anwendungsfall angewandt. Eine Validierung an einem Anwendungsfall, der bereits für die Entwicklung herangezogen wurde, ist nicht möglich.

Die Validierung der Methode findet an einem industriellen Anwendungsfall in der Getriebemontage statt, der im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben wird. Die für die Methode benötigten Werkzeuge und Hilfsmittel liegen wie in Abschnitt 8.2 beschrieben bereits vor. Ziel der Validierung ist, die Erfüllung der in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen durch die Anwendung der Methode nachzuweisen.



*Abbildung 38: Entwicklungsszenario für die Methode:
Lernfabrik für vernetzte Produktion am Fraunhofer IGCV*

8.3.2 Beschreibung des Anwendungsfalls

Als Anwendungsfall zur Validierung der Methode wurde eine Getriebemontage in der SPN Schwaben Präzision Fritz Hopf GmbH im Werk Nördlingen ausgewählt. Das Unternehmen zeichnet sich durch kundenspezifische Antriebslösungen aus

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

und produziert Getriebe bereits ab einer Stückzahl von 1. Die Erprobung der Methode fand im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts „Synchronisierung von Digitalisierung, Qualitätssicherung und Assistenzsystemen an Arbeitsplätzen mit geringem Automatisierungsgrad“ mit der Kurzbezeichnung „SynDi-QuAss“ statt. Dieses Verbundprojekt wurde auf Basis des Programms „Zukunft der Arbeit“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Der Anwendungsfall umfasst die Montage eines zweistufigen Planetengetriebes (Abbildung 39). Vor der Montage stattfindende Fertigungsschritte (z. B. spanende Bearbeitung) werden nicht betrachtet. Die Montage des Getriebes findet an Systemarbeitsplätzen statt, an denen ein Großteil des Materials bereitgestellt wird. Einzelne Komponenten werden zusätzlich auftragsbezogen bereitgestellt. Alle notwendigen Montagehilfsmittel sind am Systemarbeitsplatz (Abbildung 40) vorhanden.



Abbildung 39: Zweistufiges Planetengetriebe

Im Folgenden wird die Validierung der Methode an diesem Anwendungsbeispiel dargestellt. Die fünf Abschnitte verkörpern jeweils einen der fünf Methodenschritte. Aufgrund betrieblicher Interessen wird dabei auf eine Darstellung detaillierter technischer Spezifikationen des Getriebes verzichtet.



Abbildung 40: Systemarbeitsplatz für die Getriebemontage bei SPN

8.3.3 Ermittelte Bedarfe

Die Prozessschritte der Montage wurden dem ersten Methodenschritt entsprechend einheitlich beschrieben und hier in einem Ausschnitt dargestellt (Tabelle 29). Im Rahmen von Expertenworkshops wurden die neun Einzelkomplexitäten zur Bestimmung der drei Komplexitätsdimensionen Wahrnehmungs-, Durchführungs- und Dokumentationskomplexität (WK, DK und DOK) bestimmt. Die Einzelkomplexitäten finden sich im Anhang dieser Arbeit. Die drei aggregierten Komplexitäten sind in diesem Abschnitt dargestellt (Tabelle 29).

Tabelle 29: Ausschnitt der Prozessschritte des Anwendungsfalls der Validierung mit Bewertung der drei Komplexitätsdimensionen

Prozessschritt	Funktion der Montage	WK	DK	DOK
Sicherungsring montieren	Fügen (Zusammensetzen)	9	120	24
Lager aufpressen	Fügen (Anpressen)	40	192	16
Planetenträger in Gehäuse einfahren	Fügen (Zusammensetzen)	7	32	16

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Baugruppe auf Presstisch aufsetzen	Handhaben (Bewegen)	8	20	12
Zweites Lager am Innenring aufpressen	Fügen (Anpressen)	8	48	40
Sicherungsring montieren	Fügen (Zusammensetzen)	45	200	64
Scheibe einlegen	Justieren (Justieren durch Fügen von Ausgleichsteilen)	720	480	384
Planetenräder mit Benadelungsgerät einbringen	Fügen (Zusammensetzen)	175	150	32
Planetenräder befetten	Sonderoperationen (Ölen)	45	80	36
Planetenrad aufsetzen	Fügen (Zusammensetzen)	8	20	32
1. Stufe fetten	Sonderoperationen (Ölen)	45	96	60
Stahlscheibe auflegen	Fügen (Zusammensetzen)	720	480	160

Auf Basis der hohen Komplexität und der Zuordnung von Komplexitätsdimensionen zu Grundtypen (Tabelle 16) wurden folgende Grundtypen der Assistenzfunktionen ermittelt:

- Durchgehende Werkerinformation über den gesamten Prozess
- Manuelle Dokumentation einzelner Prozessschritte zur Rückverfolgbarkeit
- Automatisierte Dokumentation der aufgelegten Schreibe
- Qualitätssicherung für das Einlegen von Scheiben

Für die Grundtypen manuelle Produktbeschreibung sowie Produktaktualisierung wird keine Assistenzfunktion angestrebt. Als Kostenrahmen für das Assistenzsystem sind max. 10.000 EUR pro Arbeitsplatz für die Konzeptionierung und Komponentenauswahl vorgesehen.

8.3.4 Ergebnisse der partizipativen Technologievorauswahl

Im Rahmen der partizipativen Technologievorauswahl wurden zehn ausgewählte Interaktionskomponenten mit Montagemitarbeitern der SPN Schwaben Präzision erprobt (Abbildung 41). Insgesamt wurde die Erprobung mit 19 Montagemitarbeiterinnen und Montagemitarbeitern durchgeführt. Ort der Erprobung war die Montagehalle, in der auch das Assistenzsystem eingeführt werden sollte. Die Erprobung fand im Zeitraum vom 19.09.2018 bis 01.10.2018 statt. Der Montagearbeitsplatz wurde speziell für das Planetengetriebe ausgerüstet. Die Rohdaten der Fragebögen und die dazugehörige vollständige Auswertung finden sich im Anhang dieser Arbeit. Im Folgenden wird zusammenfassend auf die zentralen Aspekte der Erprobungsergebnisse eingegangen.

Ein zentraler Aspekt der Fragbögen stellt die Bereitschaft zur Nutzung dar. Die zu bewertende Aussage ist hierzu bei Eingabe- und Ausgabekomponenten nach Bedarf gestaltet:

- Zu bewertende Aussage bei Eingabekomponenten: „Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z. B. Anleitungen) nutzen“
- Zu bewertende Aussage bei Eingabekomponenten: „Ich möchte das System gerne zum Dokumentieren und Navigieren (z. B. Anleitungen) nutzen.“



Abbildung 41: Erprobung unterschiedlicher Interaktionskomponenten vor Ort bei SPN

Die Bewertung erfolgt wie in Kapitel 7.3.4 dargestellt auf Basis einer fünfstufigen Skala. Hierbei wurde die Bereitschaft zur Nutzung mit Werten von 2,1 (Myo-Armband) bis 4,7 (Touch-Display) bewertet (Abbildung 42).

Die Bewertung hatte zur Folge, dass alle Komponenten, bei denen der Mittelwert der Nutzungsbereitschaft geringer als 3 bewertet worden waren, von der weiteren Nutzung ausgeschlossen wurden, nämlich die Komponenten der Spracherkennung und der Gestensteuerung.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

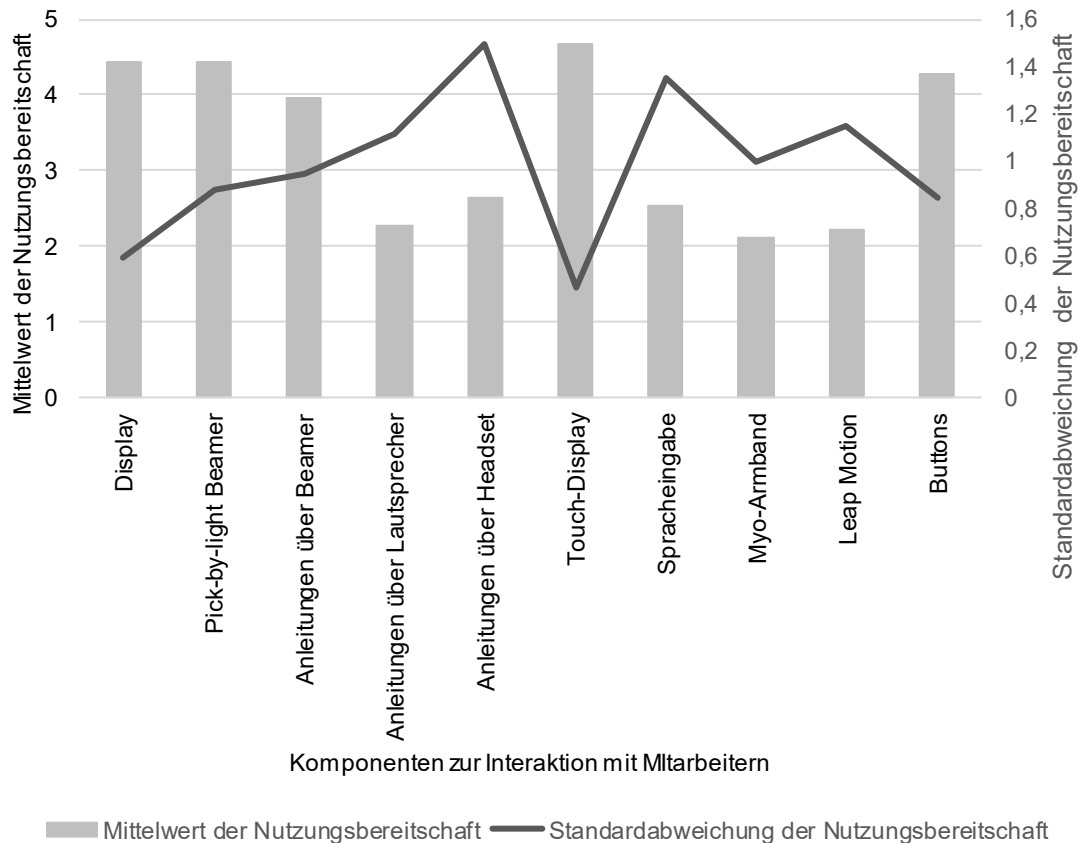


Abbildung 42: Bewertung der Nutzungsbereitschaft unterschiedlicher Ausgabe- und Eingabekomponenten im Rahmen der partizipativen Technologievorauswahl

Zusätzlich wurde die Standardabweichung der Bewertungsergebnisse analysiert (Abbildung 42). Hierbei fällt auf, dass die fünf Komponenten mit der geringsten Bewertung der Nutzungsbereitschaft die fünf Komponenten mit der höchsten Standardabweichung sind.

Nach Betrachtung der Rohdaten und Analysen mit den Teilnehmern im Anschluss an die Erprobung konnte die Ursache hierfür identifiziert werden. Die Komponenten mit großer Standardabweichung hatten Schwächen in der Prozesssicherheit und ein Teil der Mitarbeiter konnte mit diesen Komponenten nicht produktiv arbeiten. Diese Komponenten erhielten zwar ein durchschnittliches Ergebnis im Mittelfeld, aber kaum Einzelbewertungen in diesem mittleren Bereich, sondern weitestgehend entweder sehr hohe oder sehr niedrige Bewertungen.

8.3.5 Konzipierte Assistenzfunktionen

Auf Basis der Erprobungserfahrungen sowie der Komplexitätsbewertung des Arbeitsplatzes wurden zu den vier ermittelten Grundtypen acht verschiedene Assistenzfunktionen konzipiert (Tabelle 30). Die Detaillierung dieser Assistenzfunktionen wird im Folgenden mittels der in Abschnitt 7.4.3 entwickelten Schablone spezifiziert. Neben dem Namen sind hierbei noch Priorität, User Story sowie die benötigten Fähigkeiten abgebildet.

Tabelle 30: Konzipierte Assistenzfunktionen der Validierung

Grundtyp	Konzipierte Assistenzfunktionen
Werkerinformation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Montageanleitung (1) ▪ Hinweis auf benötigtes Material (2)
Manuelle Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Textueller Fehlerdokumentation (3)
Automatisierte Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fotodokumentation (4) ▪ Auftragsidentifikation (5) ▪ Seriennummerndokumentation (6) ▪ Quittierung von Materialentnahmen (7)
Qualitätssicherung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erkennung von Montagefehlern (8)

Die Assistenzfunktionen der Werkerinformation umfassen eine durchgängige Montageanleitung (Abbildung 43) sowie visuelle Hinweise auf benötigte Materialien (Abbildung 44), wenn diese für spezifische Arbeitsschritte benötigt werden. Bei der Montageanleitung ist die schnelle Verfügbarkeit einer Zusammenstellungszeichnung zum jeweiligen Auftrag von großer Relevanz. Im Bereich der manuellen Dokumentation wird als Assistenzfunktion eine mögliche Fehlerdokumentation bei jedem Prozessschritt (Abbildung 45) vorgesehen.

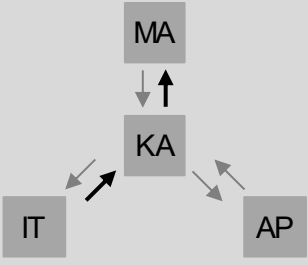
1	Montageanleitung	Priorität: Muss
 <p>Grundtyp 1 Werkerinformation</p>	Als Monteur möchte ich die korrekte Montageanleitung erhalten, um Informationen über die durchzuführenden Prozessschritte zu erhalten.	
	Input: Übermittlung auftragspezifischer Informationen (#11)	Output: Detaillierte Beschreibung des Montagevorgangs (#3)

Abbildung 43: Spezifizierung der Assistenzfunktion 1 – Montageanleitung

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

2	Hinweis auf benötigtes Material	Priorität: Muss
Als Monteur möchte ich auf das benötigte Material hingewiesen werden, um Variantenfehler zu vermeiden.		
Input: Übermittlung auftragsspezifischer Informationen (#11)		Output: Bereitstellung auftragsspezifischer Informationen (#2)
Grundtyp 1 Werkerinformation		

Abbildung 44: Spezifizierung der Assistenzfunktion 2 –
Hinweis auf benötigtes Material

3	Textuelle Fehlerdokumentation	Priorität: Muss
Als Monteur möchte ich von einer Eingriffskontrolle bei falscher Teilewahl gewarnt werden, um Variantenfehler zu vermeiden		
Input: Textuelle Eingabe (#5)		Output: Auftragsspezifische Dokumentation (#9)
Grundtyp 2 Manuelle Dokumentation		

Abbildung 45: Spezifizierung der Assistenzfunktion 3 –
Textuelle Fehlerdokumentation

Die Assistenzfunktionen der automatisierten Dokumentation beinhalten die Fotodokumentation eines kritischen Prozessschritts (Abbildung 46), die Auftragsidentifikation zu Beginn der Montage (Abbildung 47) sowie die Seriennummerndokumentation bei Aufbringung des Seriennummernaufklebers (Abbildung 48). Als Kann-Assistenzfunktion ist die Quittierung von Materialentnahmen vorgesehen (Abbildung 49). Hierbei zeigt sich, dass die Assistenzfunktionen (5) und (6) den identischen Fähigkeitenbedarf besitzen. Sowohl zum Scan des Auftragsbarcodes als auch zum Scan des Seriennummernetiketts werden die gleichen Fähigkeiten benötigt.

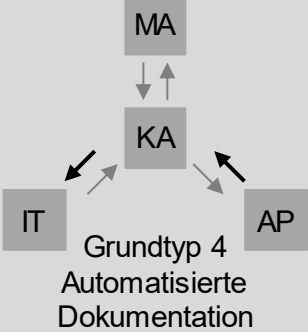
4	Fotodokumentation	Priorität: Muss
 <p>Grundtyp 4 Automatisierte Dokumentation</p>	Als Monteur möchte ich, dass eine Fotodokumentation durchgeführt wird, um die korrekte Montage nachweisen zu können.	
	Input: Bildaufnahme (#16)	Output: Auftragsspezifische Dokumentation (#9)

Abbildung 46: Spezifizierung der Assistenzfunktion 4 – Fotodokumentation

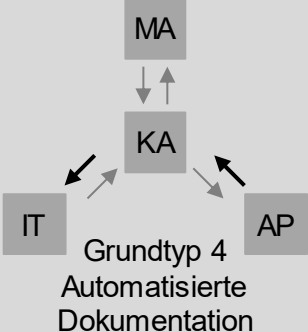
5	Auftragsidentifikation	Priorität: Muss
 <p>Grundtyp 4 Automatisierte Dokumentation</p>	Als Monteur möchte ich, dass der jeweilige Auftrag identifiziert wird, damit das Assistenzsystem den aktuellen Auftrag erkennt.	
	Input: Produktidentifikation (#15)	Output: Auftragsspezifische Dokumentation (#9)

Abbildung 47: Spezifizierung der Assistenzfunktion 5 – Auftragsidentifikation

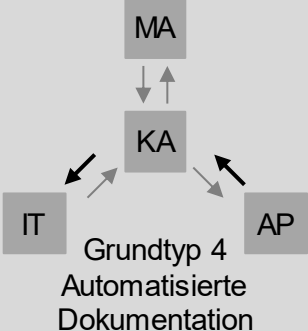
6	Seriennummerndokumentation	Priorität: Muss
 <p>Grundtyp 4 Automatisierte Dokumentation</p>	Als Monteur möchte ich Seriennummern dokumentieren, um eine Rückverfolgbarkeit zu ermöglichen.	
	Input: Produktidentifikation (#15)	Output: Auftragsspezifische Dokumentation (#9)

Abbildung 48: Spezifizierung der Assistenzfunktion 6 –
Seriennummerndokumentation

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

7	Quittierung von Materialentnahmen	Priorität: Kann
	Als Monteur möchte ich, dass Materialentnahmen quittiert werden, damit immer genügend Material zur Verfügung steht.	
	Input: Erkennung Greifvorgänge (#18)	Output: Auftragsspezifische Dokumentation (#9)

Abbildung 49: Spezifizierung der Assistenzfunktion 7 – Quittierung von Materialentnahmen

Im Bereich der Qualitätssicherung soll die Erkennung von Montagefehlern bei einem kritischen Prozessschritt berücksichtigt werden (Abbildung 50). Diese Assistenzfunktion ist ebenfalls als Kann-Assistenzfunktion vorgesehen. Insgesamt existieren somit sechs Assistenzfunktionen der Priorität *Muss* und zwei der Priorität *Kann*.

8	Erkennung von Montagefehlern	Priorität: Kann
	Als Monteur möchte ich bei Fehlern gewarnt werden, um alle Produkte fehlerfrei montieren zu können.	
	Input: Erkennung Fügevorgänge (#17)	Output: Warnung (#1)

Abbildung 50: Spezifizierung der Assistenzfunktion 8 – Erkennung von Montagefehlern

8.3.6 Generierte Assistenzsystemlösungen

Die spezifizierten Assistenzfunktionen umfassen sechs der Priorität *Muss* und zwei der Priorität *Kann*. Aus den zwei Assistenzfunktionen mit Kann-Priorität werden alle vier kombinatorisch möglichen alternativen Assistenzsystemkonzepte erzeugt

und jeweils die benötigten Fähigkeiten spezifiziert (Tabelle 31). Die Spezifizierung der Fähigkeiten erfolgt auf Basis der in Kapitel 6.4 definierten Nummerierung. Systemalternative I umfasst lediglich alle *Muss*-Assistenzfunktionen. Die Alternativen II und III enthalten mit der Quittierung von Materialentnahmen bzw. der Erkennung von Montagefehlern jeweils eine weitere Assistenzfunktion. Die Systemalternative IV enthält beide *Kann*-Assistenzfunktionen und ist als die höchste Ausbaustufe für das System zu sehen.

Tabelle 31: Alternative Assistenzsystemkonzepte und deren Fähigkeitenbedarfe

Systemalternative	Assistenzfunktionen	Fähigkeitenbedarf
I	1,2,3,4,5,6	#2,#3,#5,#9,#11,#15,#16
II	1,2,3,4,5,6,7	#2,#3,#5,#9,#11,#15,#16,#18
III	1,2,3,4,5,6,8	#1,#2,#3,#5,#9,#11,#15,#16,#17
IV	1,2,3,4,5,6,7,8	#1,#2,#3,#5,#9,#11,#15,#16,#17,#18

Die spezifizierten Fähigkeiten bilden die Basis für die kostenbasierte Optimierung. Auf Basis der Erprobungsergebnisse wurde eine anwendungsfallspezifische Anpassung der Technologie- und Komponentendatenbank durchgeführt. Die Erprobung zeigte, dass Sprach- und Gestensteuerung nicht akzeptiert waren. Beide Technologien wurden daher für diesen Anwendungsfall ausgeschlossen.

Für die vier verbleibenden Assistenzsystemalternativen wurde eine kostenoptimierte Komponentenauswahl durchgeführt (Tabelle 32). Hierbei zeigte sich, dass das für den Anwendungsfall ausgewählte Pick-by-Light-System ohne Eingriffskontrolle eine manuelle Dokumentation per Tastendruck bereitstellen kann. Die Dokumentation der Materialentnahme soll daher als manuelle Dokumentation umgesetzt werden, wodurch 3.000 EUR pro Arbeitsplatz eingespart werden können. Für die weiteren Betrachtungen werden lediglich die Systemalternativen I und III betrachtet. Mit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll neben der grundsätzlichen Amortisationsrechnung vor allem die Frage geklärt werden, ob die zusätzlichen Kosten für eine Bildverarbeitung rentabel sind.

Die ausgewählte IT-Plattform der paragon semvox GmbH konnte im Rahmen des geförderten Verbundprojekts „SynDiQuAss“ ohne Lizenzkosten genutzt werden, da diese im Projekt weiterentwickelt wurde. Für eine bessere Übertragbarkeit der Wirtschaftlichkeitsbewertung wird für die IT-Plattform der Preis eines alternativen Softwareprodukts mit vergleichbarem Funktionsumfang angesetzt.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Tabelle 32: Komponentenauswahl für die Assistenzsystemalternativen

Komponente	Kosten in EUR	Systemalternative			
		I	II	III	IV
IT-Plattform	1.400 jährlich	✓	✓	✓	✓
PC	500 einmalig	✓	✓	✓	✓
Touchscreen	400 einmalig	✓	✓	✓	✓
Pick-by-Light-System ohne Eingriffskontrolle	6.500 einmalig	✓	✗	✓	✗
Pick-by-Light-System mit Eingriffskontrolle	9.500 einmalig	✗	✓	✗	✓
Kamera ohne Bildverarbeitungssoftware	300 einmalig	✓	✓	✗	✗
Kamera mit Bildverarbeitungssoftware	2.800 einmalig	✗	✗	✓	✓
Barcode Scanner	50 einmalig	✓	✓	✓	✓

Legende:

✓: Komponente in Alternative enthalten

✗: Komponente nicht in Alternative enthalten

8.3.7 Wirtschaftliche Systembewertung

Für die wirtschaftliche Bewertung der Systeme soll als quantitative Dimension die Amortisationszeit berechnet werden (Tabelle 33). Hierzu ist der jährliche Nutzen quantitativ zu bewerten, der den Investitionskosten von 7.750 EUR (Systemalternative I) bzw. 10.250 EUR (Systemalternative III) gegenübersteht.

Tabelle 33: Schätzung jährlicher Kosteneinsparungen durch das Assistenzsystem

Geldstrom	Potenzial	Mögliche Kosteneinsparung pro Jahr in EUR
Qualifizierungskosten	Kostensenkung durch eigenständige und schnellere Einarbeitung neuer Mitarbeiter	6.000
Material	Senkung von Ausschusskosten durch Fehlervermeidung	2.000
Nacharbeitskosten (Nur Systemalternative III)	Senkung von Stückkosten durch die Vermeidung von Nacharbeitskosten	2.000

Für die Schätzung der jährlich einzusparenden Qualifizierungskosten wurden 60 Qualifikationsstunden zu jeweils 100 EUR angenommen. Dies entspricht den Kosten für Personal, das zum Training neuer Mitarbeiter bereitgestellt werden

müsste, wenn kein Assistenzsystem existiert. Eingesparte Materialkosten umfassen den Ausschuss, der durch das Assistenzsystem vermieden werden kann. Nacharbeitskosten entfallen in Höhe von 2.000 EUR, wenn Fehler direkt im Prozess erkannt und behoben werden können. Dies kann z. B. eine aufwändige Demontage sein, wenn Fehler erst bei einer Qualitätsprüfung nach Ende der Montage erkannt werden. Im Extremfall kann es zu Kosten durch Rückrufe und einem Austausch des Getriebes beim Kunden weltweit vor Ort kommen. Der durch Qualitätsprobleme entstehende Vertrauensverlust beim Kunden ist nicht mit in die jährlichen Einsparungen eingerechnet, sondern wird bei der qualitativen Bewertung berücksichtigt.

Weitere zu berücksichtigende Kosten und Einsparungen liegen in indirekten Unternehmensbereichen, die mit der Erstellung, Pflege und Freigabe von Arbeitsanweisungen und Prüfprotokollen beauftragt sind. Ist kein Assistenzsystem eingeführt, werden diese regelmäßig in Textverarbeitungsprogrammen erstellt und als Papierdokument verteilt. Für die Erstellung von Arbeitsanweisungen und Prüfprotokollen soll für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angenommen werden, dass durch das kognitive Assistenzsystem keine Änderung des Aufwands für Erstellung, Pflege und Freigabe von Arbeitsanweisungen und Prüfprotokollen im Vergleich zur bisherigen Vorgehensweise entsteht.

Auf Basis des jährlichen Nutzens durch Kosteneinsparungen und den jährlichen Lizenzkosten des Assistenzsystems berechnet sich ein jährlicher Deckungsbeitrag. Dieser wird den einmaligen Investitionskosten gegenübergestellt, um die Amortisationszeit der Systemalternativen zu berechnen (Tabelle 34).

Tabelle 34: Amortisationszeiten der Assistenzsysteme

Kennzahl	Systemalternative I	Systemalternative III
Investitionskosten in EUR	7.750	10.250
Jährliche Kosten pro Jahr in EUR	1.400	1.400
Jährlicher Nutzen in EUR	8.000	10.000
Jährlicher Deckungsbeitrag in EUR	6.600	8.600
Amortisationszeit in Jahren	1,17	1,19

Die ermittelten Amortisationszeiten betragen bei beiden Systemalternativen ca. ein Jahr und rechtfertigen die jeweilige Investition. Die Entscheidung, ob die optische Qualitätsprüfung mit Kamera eingesetzt wird, sollte jedoch nicht allein auf Basis

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

der sehr ähnlichen Amortisationszeiten getroffen werden. Entsprechend der Methode wurde im Rahmen von Workshops auch eine Bewertung qualitativer Nutzenaspekte durchgeführt (Tabelle 35). Hierbei wurden vier zentrale Nutzenaspekte identifiziert und deren Gewichtungen ermittelt.

Tabelle 35: Bewertung qualitativer Nutzenaspekte

Qualitativer Nutzenaspekt	Gewichtung	Bewertung Alternative I	Nutzwert Alternative I	Bewertung Alternative III	Nutzwert Alternative III
Kundenzufriedenheit	0,375	8	3	9	3,375
Qualität	0,375	7	2,625	9	3,375
Dokumentationsaufwand	0,125	8	1	8	1
Flexibilität	0,125	7	0,875	5	0,625
Gesamt			7,5		8,375

Im paarweisen Vergleich wurden Kundenzufriedenheit und Qualität als gleichrangig bewertet und jeweils höher gewichtet als die ebenfalls gleichrangig gewichteten Kriterien Dokumentationsaufwand und Flexibilität. Die berechneten Gewichtungen fließen schließlich in die qualitative Bewertung ein (Tabelle 35).

Die Bewertung der vier Kriterien unterliegt den subjektiven Einschätzungen der Bewertenden. Die Kundenzufriedenheit wurde bei Alternative III höher bewertet, da durch die prozessintegrierte Qualitätssicherung weniger Fehler zu erwarten sind, die zu Imageverlusten, Vertrauensverlusten, bis hin zu einem Bestellstopp führen können. Die Qualitätssicherung wirkt sich auch maßgeblich auf die Qualität, da Qualitätsaudits leichter erfolgreich bestanden werden können. Mit Hilfe der Fotodokumentation zur Seriennummer können Nachweise einfacher erbracht werden. Das Qualitätsmanagement basiert daher nicht allein auf der Qualifikation der Mitarbeiter, sondern wird auch durch technische Werkzeuge ergänzt. Der Dokumentationsaufwand wird bei beiden Alternativen stark reduziert. Die Flexibilität ist bei Alternative III trotzdem geringer, da die Bildverarbeitung auf das jeweilige Produkt speziell angepasst werden muss. Trotz der schlechteren Bewertung der Flexibilität bei jedoch besserer Bewertung von Kundenzufriedenheit und Qualität, erhält Alternative III mit einem Nutzwert von 8,375 eine höhere Bewertung als Alternative I mit 7,5.

Beide Systemalternativen wurden entsprechend des fünften Methodenschritts in einer Matrix aufgetragen (Abbildung 51). Hierbei ist zu beachten, dass die Amortisationszeit invers interpretiert werden muss, eine geringere Amortisationszeit ist besser.

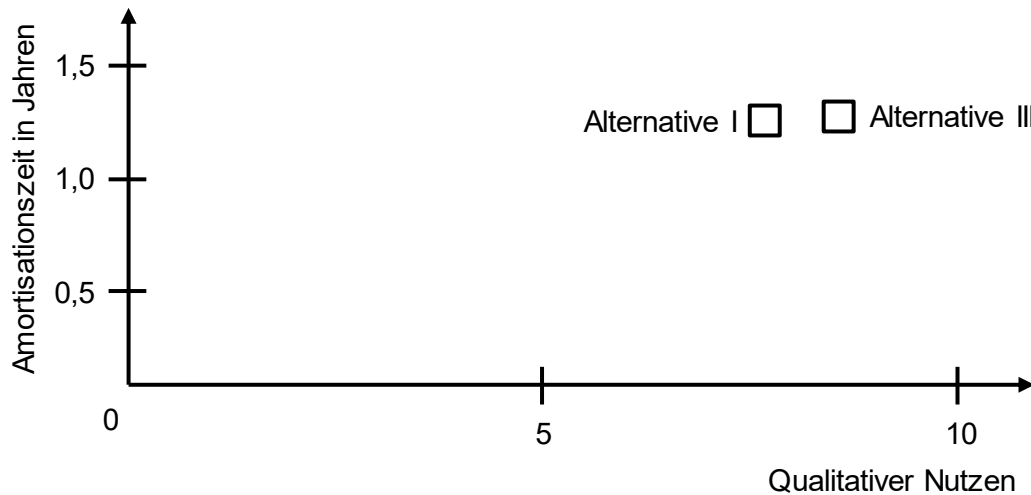


Abbildung 51: *Vergleich der Systemalternativen I und III hinsichtlich qualitativen Nutzens und Amortisationszeit*

In der Matrix ist keine Systemalternative der anderen in beiden Dimensionen eindeutig überlegen. Der Unterschied beider Amortisationszeiten ist marginal. Daher soll mittelfristig Alternative III zum Einsatz kommen. Kurzfristig soll jedoch Alternative I realisiert werden, um erste Erfahrungen mit dem Assistenzsystem zu sammeln. Hierbei wird für die Fotodokumentation eine Kamera eingesetzt, die nachträglich um ein Bildverarbeitungssystem zur integrierten Qualitätssicherung erweitert werden kann. Alternative III soll nach Umsetzung von Alternative I als höhere Ausbaustufe zum Einsatz kommen. Deshalb muss auf die Flexibilität der Software geachtet werden, um bei neuen Produkten eine möglichst einfache Anpassung an neue Qualitätsmerkmale zu ermöglichen.

8.4 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

8.4.1 Anforderungsbezogene technische Bewertung

Die im Rahmen der Validierung ermittelten Ergebnisse zeigen die Vorteile der Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage. Komplexitätsbewertung und partizipative Technologievorauswahl unterstützen

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

maßgeblich die Akzeptanz des einzuführenden Assistenzsystems. Die unterschiedlichen Systemkonzepte werden abschließend technisch-wirtschaftlich bewertet. In diesem Abschnitt wird die Erfüllung der in Kapitel 4 spezifizierten Anforderungen an die Methode (Tabelle 36) diskutiert. Im nächsten Abschnitt folgt die wirtschaftliche Bewertung.

Die Anforderung *Bedarfsgerechte Komplexitätsbewertung der manuellen Montage* wurde umgesetzt, indem für den ersten Methodenschritt ein Bewertungsschema, bestehend aus Wahrnehmungs-, Durchführungs- und Dokumentationskomplexität, geschaffen wurde. Dieses Bewertungsschema bewertet genau die Komplexitätstreiber, die durch kognitive Assistenzsysteme beherrscht werden können. Parameter, die nicht durch Assistenzsysteme am Arbeitsplatz unterstützt werden können, sind in der Bewertung nicht enthalten. Es erfolgt weiterhin keine Aggregation aller Komplexitätstreiber zu einer Kennzahl. Stattdessen werden die drei Dimensionen getrennt bewertet und methodisch die notwendigen Grundtypen abgeleitet.

Tabelle 36: *Bewertung des Erfüllungsgrades der an die Methode gestellten Anforderungen*

Anforderung	Erfüllungsgrad
Bedarfsgerechte Komplexitätsbewertung der manuellen Montage	●
Technologiefreie Beschreibung von Assistenzfunktionen und Berücksichtigung alternativer Assistenzsystemkonzepte	●
Einbindung von Nutzern in den Einführungsprozess	●
Umfassende Wirtschaftlichkeitsbewertung	●

Legende:

- : Anforderung nahezu vollständig erfüllt
- : Anforderung größtenteils erfüllt

Durch die entwickelte Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen wird die Anforderung der *technologiefreien Beschreibung von Assistenzfunktionen und Berücksichtigung alternativer Assistenzsystemkonzepte* erfüllt. Durch die Spezifikation von Grundtyp und der pro Informationsfluss benötigten Fähigkeiten im dritten Methodenschritt wird die jeweilige Assistenzfunktion technologiefrei beschrieben. Erst im vierten Methodenschritt bei der kostenbasierten Optimierung werden konkrete Komponenten und Technologien dem Systemkonzept zugeordnet. Durch die

Möglichkeit, Assistenzfunktionen unterschiedlich zu priorisieren, werden verschiedene Ausbaustufen von Assistenzsystemen aufgespannt. Im weiteren Verlauf erfolgt eine schrittweise Eingrenzung des Lösungsraums.

Die *Einbindung von Nutzern in den Einführungsprozess* wird mit der partizipativen Technologievorauswahl im zweiten Methodenschritt umgesetzt. Der speziell für diese Methode konzipierte und aufgebaute mobile Montagearbeitsplatz kann vor Ort für Erprobungen genutzt werden. Zukünftige Nutzer erleben unter Realbedingungen unterschiedliche Technologien und können maßgeblich Einfluss auf die Technologievorauswahl nehmen. Durch die umfangreiche Erprobung wird abgesichert, dass nur funktionsfähige Technologien für das Assistenzsystem implementiert werden. Zusätzlich werden durch die aktive Einbindung der Mitarbeiter psychologische Effekte erzielt, die zu einer höheren Akzeptanz in der Betriebsphase führen.

Eine *umfassende Wirtschaftlichkeitsbewertung* wird durch die Bewertung von qualitativem und quantitativem Nutzen angestrebt. Hierfür werden weiche Faktoren im Rahmen einer Nutzerwertanalyse mit paarweisem Vergleich bewertet. Quantifizierbare Faktoren werden durch die Berechnung einer wirtschaftlichen Kennzahl abgebildet. In einer Matrix erfolgt schließlich unter Berücksichtigung beider Dimensionen die finale Systemauswahl. Für die Bewertung des Nutzens kommen unterschiedliche Schätzverfahren zum Einsatz. Zur Erhöhung der Genauigkeit wäre die Verfügbarkeit von Vergleichsdaten aus der Praxis, beispielsweise in Form eines Tabellenwerks oder mathematischen Modells von Vorteil.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass drei der vier Anforderungen vollständig und eine größtenteils erfüllt worden sind. Die in Abschnitt 1.2 definierte Zielsetzung der Arbeit wurde mittels des entwickelten Systemmodells, der Modellierung kognitiver Assistenzfunktionen und der Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage erreicht.

8.4.2 Wirtschaftliche Bewertung

Wie in Abschnitt 8.2 dargestellt, erfordert die Durchführung der Methode umfangreiche Initialaufwände. Diese umfassen die Bereitstellung des mobilen Montagearbeitsplatzes sowie die softwaretechnische Umsetzung der Technologie- und Komponentendatenbank und des Optimierungsalgorithmus. Der Nutzen der Methode liegt in der Risikominimierung bei der Einführung des Assistenzsystems. Durch das strukturierte Vorgehen in der Methode wird die Akzeptanz erhöht und

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

die Nutzen des Assistenzsystems können besser auf die zu erreichenden Ziele im Montagesystem abgestimmt werden. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass bspw. ein mittelständischer Betrieb den Initialaufwand der Methode für eine einmalige Durchführung in der eigenen Montage auf sich nimmt. In einem Konzern mag dies aufgrund zahlreicher Montagesysteme wirtschaftlich sein. Aber auch hier würde die Durchführung der Methode durch eine zentrale Technologieabteilung erfolgen. Da ein Partner außerhalb der Montage, in-house oder extern, benötigt wird, soll die wirtschaftliche Bewertung auch aus der Sichtweise des Partners außerhalb der Montage durchgeführt werden.

Für die wirtschaftliche Bewertung sollen die Initialaufwände, das eingesetzte Kapital, quantifiziert werden, die für die Durchführung der Methode notwendig sind. Zudem soll der Deckungsbeitrag quantifiziert werden, der bei der Anwendung der Methode in Form eines Projekts anfällt. Auf der Basis von drei unterschiedlichen Fällen der Projektauslastung, soll die Amortisationszeit berechnet werden. Eine mögliche öffentliche Förderung wird nicht berücksichtigt. Es wird ein projektbasierter Einsatz von Mitarbeitern zur Durchführung der Methode angenommen, unabhängig von deren Kapazität und Auslastung.

Die Initialaufwände der Methode umfassen in Summe einen Betrag von ca. 68.750 EUR. Dieser setzt sich maßgeblich aus Hardware-, Software- und Integrationskosten zusammen (Tabelle 37). Die Hardwarekomponenten umfassen den mobilen Arbeitstisch, Demonstrationsprodukte für den zu integrierenden Anwendungsfall mit Variantenmaterial sowie benötigte Werkzeuge am Montagearbeitsplatz (inkl. Schrauber). Hinzu kommen Hardwarekomponenten für das Assistenzsystem. Für den hardwareseitigen Aufbau des Arbeitsplatzes wurden drei Personentage angenommen, die mit einem Kostensatz von 1.000 EUR bewertet wurden. Zusammen mit drei Softwareplattformen für das Assistenzsystem und deren technischer Integration mit der jeweiligen Hardware und den Demonstrationsprodukten entstehen für den mobilen Montagearbeitsplatz Kosten in Höhe von 53.750 EUR. Zusätzliche Kosten fallen für die Toolentwicklung und Recherchetätigkeiten zur initialen Befüllung der Technologie- und Komponentendatenbank an.

Zur Durchführung der Methode sind umfangreiche Beratungsleistungen zu erbringen. Diese werden für die jeweiligen Schritte der Methode separat kalkuliert (Tabelle 38). Dabei wird angenommen, dass die Methode von zwei externen Personen durchgeführt wird. Das Ergebnis umfasst 24 benötigte Personentage einschließlich eines Personentags zur Aktualisierung der Technologie- und Komponentendatenbank.

8.4 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Tabelle 37: Kostenbewertung der Initialaufwände der Methode

Initialaufwand	Menge	Einheit	Einzelkosten in EUR	Gesamtkosten in EUR
Mobiler Arbeitstisch	1	Stk	3.500	3.500
Demonstrationsprodukte	5	Stk	50	250
Werkzeuge	diverse		5.000	5.000
Hardware Assistenzsystem	diverse			15.000
Aufbau Hardware	3	PT	1.000	3.000
Software Assistenzsystem	3	Stk	5.000	15.000
Technische Integration	12	PT	1.000	12.000
Toolentwicklung	10	PT	1.000	10.000
Datenbankrecherche	5	PT	1.000	5.000
Gesamt				68.750

Legende: Stk: Stück, PT: Personentage

Tabelle 38: Personalaufwände zur Durchführung der Methode

Methodenschritt	Tätigkeit	Aufwand in PT
1	Besichtigung des Anwendungsfalls	2
	Workshop Komplexitätsbewertung	2
2	Logistikaufwände und Aufbau Montagearbeitsplatz	2
	Durchführung Erprobung	4
	Auswertung der Erprobung	2
3	Konzeptionierung von Assistenzfunktionen	2
	Diskussion der Assistenzfunktionen	2
4	Aktualisierung der Technologie- und Komponentendatenbank	1
	Durchführung der kostenbasierten Optimierung und Visualisierung der Systemkonzepte	2
5	Workshop zur Bewertung von Wirtschaftlichkeitskennzahlen	2
	Abschluss, Projektdokumentation	3
Gesamt		24

Legende: PT: Personentage

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Dieser Deckungsbeitrag und die Initialkosten von 68.750 EUR bieten die Ausgangsbasis für die Amortisationsrechnung. Hierbei sollen drei unterschiedliche Fälle betrachtet werden, welche eine Durchführung der Methode zwei, vier und acht Mal pro Jahr vorsehen (Tabelle 39). Die Anzahl hängt von den jeweiligen Vermarktungsaktivitäten und dem Bedarf der lokalen Industrie ab.

Tabelle 39: Fallunterscheidung zur Berechnung der Amortisationszeit

Initialaufwand	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Durchführung der Methode	2	4	8
Rückfluss pro Durchführung in EUR	9.600		
Jährlicher Rückfluss	19.200	38.400	76.800
Investitionskosten (Initialaufwände der Methode) in EUR	68.750		
Amortisationszeit in Jahren	3,6	1,8	0,9

Die Betrachtung der drei Fälle zeigt, dass bei einer zweimaligen Durchführung der Methode eine Amortisationszeit von 3,6 Jahren vorliegt. Bei viermaliger sind es 1,8 und bei der achtmaligen Durchführung 0,9 Jahre. Setzt man als Erwartung eine Amortisationszeit von zwei Jahren an, so ist die Wirtschaftlichkeit der Methode ab einer viermaligen Durchführung pro Jahr gegeben. Bei einer höheren Auslastung kann ein zusätzlicher Ertrag generiert werden.

Dabei sollte berücksichtigt werden, dass nach Amortisation der Investition keine unbegrenzte Nutzung möglich ist. Aufgrund des schnellen Technologiewandels in der Elektronikindustrie muss langfristig die Anschaffung weiterer Hardwarekomponenten in Betracht gezogen werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass in der partizipativen Technologievorauswahl stets auch aktuelle Innovationen berücksichtigt werden.

8.5 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde die prototypische Anwendung und Validierung der entwickelten Methode dargestellt. Für die technische Umsetzung der Methode wurde ein mobiler Montagearbeitsplatz aufgebaut, der die partizipative Technologievorauswahl ermöglicht. Es wurden Softwaretools zur Umsetzung der Technologie- und Komponentendatenbank sowie der kostenbasierten Optimierung präsentiert. An einem Anwendungsfall in der Getriebemontage wurde die Anwendung der Methode demonstriert. Auf Basis der Methodenerkenntnisse können die

Komponenten des Assistenzsystems für den Anwendungsfall beschafft und implementiert werden. Die technisch-wirtschaftliche Bewertung zeigt, dass die in Kapitel 4 geforderten Anforderungen größtenteils erfüllt werden konnten. Durch die Anwendung der Methode kann das Risiko bei der Einführung kognitiver Assistenzsysteme reduziert werden. Für eine eigenständige einmalige Durchführung der Methode sind die Initialaufwände jedoch zu hoch. Für eine wirtschaftliche Durchführung der Methode wird vom produzierenden Unternehmen, das für manuelle Montagearbeitsplätze kognitive Assistenzsysteme einsetzen möchte, ein weiterer Technologiepartner zur Unterstützung benötigt. Dieser Technologiepartner verantwortet die regelmäßige Aktualisierung der Technologie- und Komponentendatenbank und des mobilen Montagearbeitsplatzes. Durch diese Kooperation wird sowohl für das produzierende Unternehmen als auch für den Technologiepartner die Anwendung der Methode wirtschaftlich.

Einschränkungen und Limitationen bei der Anwendbarkeit der Methode bestehen beispielsweise in der Unikatproduktion. Da die Anwendung der Methode eine umfassende Komplexitätsbewertung erfordert, ist sie erst ab einer Serienproduktion wirtschaftlich. Bei Massenproduktion in Losgröße 1 (engl. mass customization) muss für die Komplexitätsbewertung eine repräsentative Produktauswahl herangezogen werden. Die Methode ist zudem auf die Anwendung in der manuellen Montage begrenzt. Für andere Anwendungsfälle, wie Intralogistik oder Instandhaltung, sind prozessspezifische Anpassungen der Methode notwendig. Zudem ist die Methode lediglich für eine kognitive Unterstützung anwendbar. Für eine zusätzliche physische Unterstützung muss eine umfassende Erweiterung der Methode durchgeführt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die industrielle Produktion ist von einer hohen Komplexität geprägt. Zu deren wesentlichen Treibern zählen Variantenvielfalt, individualisierte Produkte, Fachkräftemangel sowie Absatzschwankungen. Wegen des großen Kostenanteils fällt der Montage ein wichtiger Aspekt zu. Aufgrund der hohen Flexibilität ist die manuelle Montage in zahlreichen Anwendungsfällen auch heute noch von hoher Bedeutung. Um Mitarbeiter in der manuellen Montage zu unterstützen, können kognitive Assistenzsysteme eingesetzt werden. Durch diese können Informationen mit den Mitarbeitern bidirektional ausgetauscht werden. Damit werden Produktivitäts- und Qualitätssteigerungen erzielt, da sich Mitarbeiter auf die wertschöpfenden Aspekte ihrer Arbeit konzentrieren können und die Informationsverarbeitung weitestgehend durch die IT übernommen wird. Hierbei ist der Autonomiegrad des Systems zu bestimmen und aus einer Vielzahl technologischer Komponenten eine Auswahl zu treffen. Zudem müssen Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit kognitiver Assistenzsysteme abgesichert werden. Es bedarf daher je nach Unternehmen und Anwendungsfall eine individuell abgestimmte Einführungsstrategie.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage entwickelt. Diese gibt in Form einer Handlungsanleitung dem Anwender eine Hilfestellung, welches Assistenzsystem für das vorliegende Montagesystem zu implementieren ist.

Diese Arbeit stellt zu Beginn die notwendigen Grundlagen dar, die Unterscheidung zwischen kognitiven und physischen Assistenzsystemen und welche Technologien in Praxis und Forschung zum Einsatz kommen. Ferner wird die manuelle Montage und deren Organisation dargestellt. Im Bereich der Arbeitswissenschaft wird ein Schwerpunkt auf den Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme gelegt, welcher ein iteratives Verfahren mit enger Einbindung der Nutzer darstellt.

Die Analyse des aktuellen Stands der Forschung und Technik zeigt, dass bereits umfangreiche Bewertungsmethoden zur Bestimmung der Komplexität in der Produktion bestehen, um beispielsweise die Produktgestaltung zu optimieren. Für kognitive Assistenzsysteme bestehen bereits zahlreiche Möglichkeiten der Klassi-

fizierung und auch in der Akzeptanzforschung für neue Technologien existiert bereits eine Vielzahl an Instrumenten. Bisherige Methoden zur Auswahl kognitiver Assistenzsysteme fokussieren sich häufig auf den Bereich der reinen Informationsbereitstellung. Ein umfassender Einführungsprozess, eine Informationseingaben durch den Monteur, eine methodische Einbindung der Nutzer sowie eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbewertung enthält, findet sich nicht in der Literatur.

Auf der Basis der Zielstellung und des aktuellen Stands der Forschung und Technik wurden mehrere zentrale Anforderungen an die Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme identifiziert.

Für diese Methode wurde ein Systemmodell für kognitive Assistenzsysteme sowie eine Modellierung für Assistenzfunktionen entwickelt. Das Systemmodell strukturiert kognitive Assistenzsysteme in Komponenten, Technologien und Fähigkeiten.

Assistenzfunktionen werden durch ihre Beschreibung des Informationsflusses zwischen Assistenzsystem, Montagemitarbeiter, IT-Systemen sowie Montagearbeitsplatz spezifiziert. Hierzu wurden sechs Grundtypen kognitiver Assistenzsysteme abgeleitet sowie ein Spektrum an möglichen Fähigkeiten aufgestellt.

Die Methode zur Einführung kognitiver Assistenzsysteme besteht aus fünf Schritten. In der Bedarfsanalyse werden Komplexitäten des Anwendungsfalls bewertet, Grundtypen für Assistenzfunktionen sowie der Kostenrahmen bestimmt. Mittels der partizipativen Technologievorauswahl wird Nutzerfeedback zu unterschiedlichen Interaktionstechnologien aufgenommen, um die Akzeptanz des Assistenzsystems abzusichern. Auf Basis dieser Erprobungsergebnisse und den zuvor bestimmten Grundtypen werden detailliert spezifizierte Systemkonzepte für kognitive Assistenzsysteme aufgestellt, denen die jeweiligen Fähigkeiten zugeordnet sind. Bei der Generierung alternativer Assistenzsystemlösungen erfolgt mittels eines Optimierungsmodells eine kostenbasierte Komponentenauswahl, die jeder funktionalen Systemalternative die kostenoptimale Umsetzung zuordnet. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung werden sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte berücksichtigt, um eine Systemalternative für die Beschaffung und Implementierung auszuwählen.

Zur Umsetzung und Validierung der Methode wurde ein mobiler Montagearbeitsplatz aufgebaut, der die partizipative Technologievorauswahl am zukünftigen Anwendungsort ermöglicht. Dieser stellt unterschiedliche Interaktionskomponenten

für die Erprobung bereit, um sicherzustellen, dass die einzuführenden Technologien auch Akzeptanz unter den Montagemitarbeitern finden. Weiterhin wurden Tools entwickelt, welche die für die Methode benötigte Technologie- und Komponentendatenbank sowie die kostenbasierte Optimierung softwaretechnisch ermöglichen. Die Validierung der Methode fand an einem industriellen Anwendungsfall in der Montage von Planetengetrieben statt, der die Funktionsfähigkeit der Methode belegen konnte.

9.2 Ausblick

Die entwickelte Methode wurde für den Anwendungsfall der manuellen Montage konzipiert. Dabei wurde der Einführungsprozess und nicht die Betriebsphase des Assistenzsystems betrachtet. Ausgehend von der in dieser Arbeit entwickelten Methode lassen sich zusätzliche Forschungsfelder identifizieren.

Für kognitive Assistenzsysteme bieten sich neben der manuellen Montage zahlreiche weitere Anwendungsfälle in der industriellen Produktion. Hierzu zählen beispielsweise die Fertigung oder Intralogistikprozesse wie Kommissionierung, Materialbereitstellung oder Versand. Auch in der Instandhaltung ergeben sich mit der Wartung oder der Instandsetzung zahlreiche potenzielle Anwendungsfälle. Eine Übertragung der Methode in diese Anwendungsfälle ist in Teilen möglich. Das Systemmodell mit seiner Technologie- und Komponentendatenbank kann weitestgehend übertragen werden. Jedoch müssen für die Bewertung des Unterstützungsbedarfs und der Beschreibung der Assistenzfunktion anwendungsfallsspezifische Anpassungen vorgenommen werden.

Neben der Einführung von Assistenzsystemen weist auch die Betriebsphase von kognitiven Assistenzsystemen in der manuellen Montage noch weitere zukünftig wissenschaftlich interessante Aspekte auf. Hierzu zählt bspw. die Generierung von Inhalten für kognitive Assistenzsysteme. Während in der Produktentwicklung 3D-CAD Systeme weit verbreitet sind, werden diese Daten kaum durchgängig für die Generierung von Arbeitsanweisungen genutzt. Der Stand der Technik ist die manuelle Generierung von Inhalten für Werkerinformationssysteme durch die Aufnahme von Bildern sowie das Anfertigen von textuellen Beschreibungen. Diese Inhaltserstellung möglichst hoch zu automatisieren, stellt ein Forschungsgebiet mit hohem industriellen Nutzen dar. Ist es möglich, die Anweisungsdaten und Prüfprotokolle automatisiert aus Daten der Konstruktion für kognitive Assistenzsysteme zu übertragen, so steigt deren Wirtschaftlichkeit enorm an.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des fortschreitenden Fachkräftemangels nimmt die Bedeutung des Wissensmanagements zu. Kognitive Assistenzsysteme bieten zahlreiche Interaktionstechnologien am Arbeitsplatz, die auch hierfür genutzt werden könnten. Hierbei gilt es Assistenzsysteme und innovative Anreize zu ergänzen, die den Monteur zur Weitergabe seines Wissens motivieren. Gelingt dies, kann Verlust von Know-how beim Ausscheiden von Mitarbeitern entschieden reduziert werden.

Bei der Einstellung neuer Mitarbeiter ist zusätzlich der Aspekt der gezielten Mitarbeiterqualifizierung zu betrachten. Hierbei liegt die Schwierigkeit darin, die Informationsdichte kontinuierlich an den Bedarf der Mitarbeiter anzupassen. Gerade während des Qualifizierungsprozesses nimmt die Kompetenz des Mitarbeiters laufend zu. Ohne eine adaptive Anpassung des Assistenzsystems kommt es hier schnell zu einer Unter- bzw. Überforderung von Mitarbeitern. Hierbei zeigen neue Generationen von Datenbrillen hohes Potenzial bei der Bereitstellung unterschiedlicher Unterstützungsgrade. Werden adaptive Assistenzsysteme zur Mitarbeiterqualifizierung realisiert, so können während der Anlernphase Trainingskosten und -zeiten reduziert werden.

10 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 9783446425958.

ACATECH 2016

acatech (Hrsg.): Kompetenzen für die Industrie 4.0. München: Utz 2016. ISBN: 9783831645022. (acatech POSITION).

ADAM 1998

Adam, D.: Produktions-Management. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer 1998. ISBN: 9783663015901.

AEHNELT & BADER 2015

Aehnelt, M.; Bader, S.: Mobile Informationsassistentz für die Montage. In: Weidner, R.; Redlich, T. (Hrsg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität 2014, S. 370-380. ISBN: 9783868180732.

AEHNELT 2017

Aehnelt, M: Informationsassistentz zur kognitiven Automatisierung manueller Montagearbeitsplätze. Diss. Universität Rostock (2017). Rostock: Universität Rostock 2017.

AJZEN 1991

Ajzen, I.: The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50 (1991) 2, S. 179-211.

APT ET AL. 2018A

Apt, W.; Bovenschulte, M.; Priesack, K.; Weiß C.; Hartmann E. A.: Forschungsbericht 502. Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb. Bonn: Bundeministerium für Arbeit und Soziales 2018. ISSN: 01744992.

APT ET AL. 2018B

Apt, W.; Schubert, M.; Wischmann, S.: Digitale Assistenzsysteme. Perspektiven und Herausforderungen für den Einsatz in Industrie und Dienstleistungen. Berlin: Institut für Innovation und Technik 2018. ISBN: 9783897501812.

BÄCHLER ET AL. 2014

Bächler, L.; Bächler, A.; Kölz, M.; Hörz, T.; & Heidenreich, T.: Über die Entwicklung eines prozedural-interaktiven Assistenzsystems für leistungsgeminderte und -gewandelte Mitarbeiter in der manuellen Montage. Fakultät Maschinenbau. Esslingen: 2014.

BÄCHLER ET AL. 2015

Bächler, A.; Bächler, L.; Autenrieth, S.; Kurtz, P.; Heidenreich, T.; Hörz, T.; Krüll, G.: Entwicklung von Assistenzsystemen für manuelle Industrieprozesse. In: Rathmayer, S.; Pongratz, H. (Hrsg.): Proceedings of DeLFI Workshops 2015 co-located with 13th e-Learning Conference of the German Computer Society (DeLFI 2015). München, 1.9.2015, S. 56-63.

BANNAT 2014

Bannat, A.: Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion. Diss. Technische Universität München (2014). München: 2014.

BAUER ET AL. 2016

Bauer, D.; Wutzke, R.; Bauernhansl, T.: Wear@Work – A new approach for data acquisition using wearables. Procedia CIRP 50 (2016), S. 529-534.

BAUERNHANSL ET AL. 2016

Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Darmstadt: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e.V. Juni 2016.

BEDNAR & MODRAK 2014

Bednar, S.; Modrak, V.: Mass Customization and its Impact on Assembly Process' Complexity. International Journal for Quality Research 8 (2012) 3. S. 417-430.

BEETZ 2006

Beetz, S.: Beitrag zur Methode der Arbeitsplatz-integrierten Assistenz am Beispiel der Formmesstechnik. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Aachen: Shaker 2006. ISBN: 9783832249533 (Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg).

BENGLER ET AL. 2017

Bengler, K.; Lock, C.; Teubner, S.; Reinhart, G.: Grundlegende Konzepte und Modelle. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. München: Carl Hanser 2017, S. 54-60. ISBN: 9783446446427.

BISCHOFF 2015

Bischoff (Hrsg.): Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand. Mühlheim an der Ruhr: Juni 2015. (agiplan GmbH, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie).

BLÜMLING & REITHINGER 2015

Blümling, S.; Reithinger, N.: PLuTO – Portable Lern- und Wissensplattform zum Transfer episodischen Wissens in Organisationen. In: Rathmayer, S.; Pongratz, H. (Hrsg.): Proceedings of DeLFI Workshops 2015 co-located with 13th e-Learning Conference of the German Computer Society (DeLFI 2015). München, 1.9.2015, S. 10-18.

BLUTNER ET AL. 2009

Blutner, D.; Cramer, S.; Krause, S.; Mönks, T.; Nagel, L.; Reinholz, A.; Witt-haut, M.: Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung. In: Buchholz, P.; Clausen, U. (Hrsg.): Große Netze der Logistik. Berlin: Springer 2009, S. 241-270. ISBN: 9783540710479.

BOGNER ET AL. 2017

Bogner, E.; Kästle, C.; Franke, J.; Beitinger, G.: Intelligent vernetzte Elektronikproduktion. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 653-659. ISBN: 9783446454583.

BORNEWASSER ET AL. 2018

Bornewasser, M.; Bläsing, D.; Hinrichsen, S.: Informatrische Assistenzsysteme in der manuellen Montage: Ein nützliches Werkzeug zur Reduktion mentaler Beanspruchung? Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72 (2018) 4, S. 264-275.

BRANDES & BRANDES 2013

Brandes, D.; Brandes, N.: Einfach managen. 2. Aufl. München: Redline 2013. ISBN: 9783868815160.

BREITKOPF 2018

Breitkopf, N.: Adaptive Assistenz in der Produktion. Eine Methodik zur individuellen Mitarbeiterbefähigung. Diss. Universität Bochum (2018). Aachen: Shaker 2018. ISBN: 9783844059045.

BROOKE 1996

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. London: Taylor & Francis 1996, S. 189-194. ISBN: 9780748404605.

BULLINGER & LUNG 1994

Bullinger, H.-J.; Lung, M. M.: Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Wiesbaden: Springer 1994. ISBN: 9783663110477.

BURKARD 1972

Burkard, R. E.: Methoden der Ganzzahligen Optimierung. Wien: Springer 1972. ISBN: 9783709182987.

BÜTTNER ET AL. 2014

Büttner, K.; Brück, U.: Use Case Industrie 4.0-Fertigung im Siemens Elektronikwerk Amberg. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014, S. 121-144. ISBN: 9783658046811.

CIPRINA ET AL. 2018

Ciprina, A.; Mücke, J.; Schwede, C.: Digitalisierung der Möbelmontage – Mit Smart Devices in Richtung Industrie 4.0. In: WIK GmbH (Hrsg.): Wissenschaft trifft Praxis (Ausgabe 9, Januar 2018). <<https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/Wissenschaft-trifft-Praxis/magazin-wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe9.pdf>> - 28.04.2019.

CLAEYS ET AL. 2015

Claeys, A.; Hoedt, S.; Soete, N.; Van Landeghem, H.; Cottyn, J.: Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems. IFAC PapersOnLine 48 (2015) 3, S. 924-929.

COHN 2004

Cohn, M.: User Stories Applied. Boston, MA: Pearson Education 2004. ISBN: 9780321205685.

DANIELSSON ET AL. 2018

Danielsson, O.; Syberfeldt, A.; Holm, M.; Wang, L.: Operators perspective on augmented reality as a support tool in engine assembly. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 45-50.

DAVIS 1989

Davis, F. D.: Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly* 13 (1989) 3, S. 319-340.

DIN 8580

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einleitung. Berlin: Beuth 2003.

DIN 8593

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 1985.

DIN EN 9100

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN 9100: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung. Berlin: Beuth 2018.

DIN EN ISO 6385

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth 2004.

DIN EN ISO 9000

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2005.

DIN EN ISO 9241-11

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte. Berlin: Beuth 2016.

DIN EN ISO 9241-110

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin: Beuth 2006.

DIN EN ISO 9241-125

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 125: Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung. Berlin: Beuth 2017.

DIN EN ISO 9241-143

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 143: Formulardialoge. Berlin: Beuth 2012.

DIN EN ISO 9241-210

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. Berlin: Beuth 2010.

DIN ISO 16290:2016-09

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: Raumfahrtsysteme – Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien. Berlin: Beuth 2016.

DOLLINGER & REINHART 2016

Dollinger, C.; Reinhart, G.: A Competence Based Approach to Support the Working Force Within Assembly Lines. In: Schlick, C.; Trzecieliński, S. (Hrsg.): Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future. International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing (AHFE 2016). Orlando (Florida), USA, 27.-31.7.2016. Basel: Springer 2016, S. 543-556. ISBN: 9783319416960.

DOMBROWSKI ET AL. 2010

Dombrowski, U.; Wesemann, S.; Korn, G. H.: Werkerinformationssystem. ZWF 105 (2010) 4, S. 282-287.

ELMARAGHY ET AL. 2012

ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H.; Tomiyama, T.; Monostori, L.: Complexity in engineering design and manufacturing. CIRP Annals – Manufacturing Technology 61 (2012) 2, S. 793-814.

EVERSHEIM & SCHUH 2003

Eversheim, W.; Schuh, G.: Standard, individualisiert – individuell. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003, S. 55-63. ISBN: 9783642624568.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 1. 3. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. ISBN: 9783642877377

FALCK ET AL. 2016

Falck, A.; Örtengren, R.; Rosenqvist, M.; Söderberg, R.: Criteria for assessment of basic manual assembly complexity. *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 424-428.

FALCK ET AL. 2017

Falck, A.; Örtengren, R.; Rosenqvist, M.; Söderberg, R.: Basic complexity criteria and their impact on manual assembly quality in actual production. *International Journal of Industrial Ergonomics* 58 (2017), S. 117-128.

FAST-BERGLUND ET AL. 2013

Fast-Berglund, Å.; Fässberg, T.; Hellmann, F.; Davidsson, A.; Stahre, J.: Relations between complexity quality and cognitive automation in mixed-model assembly. *Journal of Manufacturing Systems* 32 (2013) 3, S.446-455.

FISCHER ET AL. 2014

Fischer, C.; Lušić, M.; Bönig, J.; Hornfeck, R.; Franke, J.: Webbasierte Werkerinformationssysteme. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 9, S. 581-585.

FISHBEIN & AJZEN 1975

Fishbein, M., & Ajzen, I.: *Belief, Attitude, Intention, and Behavior*. Boston, MA: Addison-Wesley 1975. ISBN: 9780201020892.

FRANKE & RISCH 2009

Franke, Jörg, Risch, F.: Effiziente Erstellung, Distribution und Rückmeldung von Werkerinformationen in der Montage. *ZWF* 100 (2009) 10, S. 822-826.

GAIROLA 1981

Gairola, A: *Montagegerechtes Konstruieren – Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik*. Diss. TH Darmstadt (1981). Darmstadt: 1981.

GALASKE & ANDERL 2016

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. International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing (AHFE 2016). Orlando (Florida), USA, 27.-31.7.2016. Basel: Springer 2016, S. 557-567. ISBN: 9783319416960.

GROBE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004

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, ISBN: 9783642623721.

GRUNWALD 2006

Grunwald, A.: „Hilfswissenschaften“ für die Technikwissenschaften: Naturwissenschaften, In: Banse, G.; Grundwald, A.; König, W.; Ropohl, G. (Hrsg.): Erkennen und Gestalten. Berlin: edition sigma 2006, S. 211-220. ISBN: 9783894045388.

GÜNTHNER ET AL. 2017

Günthner, W.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.: Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. 2. Aufl. Berlin: Springer 2017, S. 97-123. ISBN: 9783662532546.

HAASE ET AL. 2015

Haase, T.; Termath, W.; Schumann, M.: Integrierte Lern- und Assistenzsysteme für die Produktion von morgen. In: Meier, H (Hrsg.): Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt. Berlin: GITO 2015, S. 183-207. ISBN: 9783955451288.

HINRICHSSEN & BENDZIOCH 2018

Hinrichsen, S.; Bendzioch, S.: How Digital Assistance Systems Improve Work Productivity in Assembly. In: Nunes, I. (Hrsg.): Advances in Human Factors and Systems Interaction. International Conference on Human Factors and Systems Interaction (AHFE 2018). Orlando (Florida), USA, 21.-25.7.2018. Cham: Springer 2019, S. 332-342. ISBN: 9783319943336.

HINRICHSEN ET AL. 2016

Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A.: Assistance Systems in Manual Assembly. In: Villmer, F.-J.; Padoano, E. (Hrsg.): Production Engineering and Management. Proceedings of the 6th International Conference. Lemgo, 29.-30.9.2016. Publication Series in Direct Digital Manufacturing (2016) 1, S. 3-14.

HINRICHSEN ET AL. 2017

Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A.: Development of a Projection-Based Assistance System for Maintaining Injection Molding Tools. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapur, 10.-13.12.2017. New York: IEEE 2017, S. 1571-1575. ISBN: 9781538609484.

HOEDT ET AL. 2018

Hoedt, S.; Claeys, A.; Schamp, M.; Van Landeghem, H.; Cottyn, J.: Counteracting the forgetting effect in mixed-model manual assembly. IFAC PapersOnLine 51 (2018) 11. S. 856-861.

HOLD ET AL. 2016A

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 2016, S. 295-322. ISBN: 9783955451851.

HOLD ET AL. 2016B

Hold, P.; Ranz, F.; Sihm, W.; Hummel, V.: Planning Operator Support in Cyber-Physical Assembly Systems. IFAC-PapersOnLine 49 (2016) 32, S. 60-65.

HOLD ET AL. 2016C

Hold, P.; Sihm, W.: Towards a Model to Identify the Need and the Economic Efficiency of Digital Assistance Systems in Cyber-Physical Assembly Systems. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS). Wien, Österreich, 12.4.2016. New York: IEEE 2016, S. 1-4. ISBN: 9781509011568.

HOLD ET AL. 2017

Hold, P.; Erol, S.; Reisinger, G.; Sihm, W.: Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. Procedia Manufacturing 9 (2017), S. 143-150.

HÜSING ET AL. 2002

Hüsing, B.; Bührlen, B.; Friedewald, M.; Kimpeler, S.; Menrad, K.; Wengel, J.; Zimmer, R.; Zoche, P.: Technikakzeptanz und Nachfragemuster als Standortvorteil (2002). <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-h-69221.pdf> - 16.04.2019.

JAKOBY 2015

Jakoby, W.: Projektmanagement für Ingenieure. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. ISBN: 9783658026073.

JESKE & LENNINGS 2016

Jeske, T.; Lennings, F.: Handlungsfelder für die Arbeitsgestaltung in der Industrie 4.0. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA) (Hrsg.): Arbeit in komplexen Systemen. Digital, vernetzt, human?!, 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Aachen, 02.03.2016 - 04.03.2016. Dortmund: GfA-press 2016. ISBN: 9783936804201.

KAGERMANN 2017

Kagermann, H.: Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.: Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. 2. Aufl. Berlin: Springer 2017, S. 235-246. ISBN: 9783662532546.

KAGERMANN ET AL. 2003

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Frankfurt am Main: April 2013. (Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Forschungsunion/acatech).

KASSELMANN & WILLEKE 2016

Kasselmann, S.; Willeke, S.: Technologie-Kompodium Interaktive Assistenzsysteme. <https://www.iph-hannover.de/_media/files/downloads/Projekt_40-Ready_Technologie-Kompodium.pdf> - 05.03.2019.

KERBER & LESSEL 2015

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 co-located with 13th e-Learning Conference of the German Computer Society (DeLFI 2015). München, 1.9.2015, S. 28-35.

KLEINEBERG ET AL. 2017

Kleineberg, T.; Hinrichsen, S.; Eichelberg, M.; Busch, F.; Brockmann, D.; Vierfuß, R.: Leitfaden: Einführung von Assistenzsystemen in der Montage. Lemgo: Hochschule Ostwestfalen-Lippe. ISBN: 9783946856023.

KLUGE 1989

Kluge, F.: Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache. 22. Aufl. Berlin: de Gruyter 1989. ISBN: 9783110845037.

KOLLMANN 1998

Kollmann, T.: Akzeptanz innovativer Nutzungsgüter und -systeme. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1998. ISBN: 9783409128490.

KÖNIG ET AL. 2019

König, M.; Stadlmaier, M.; Rusch, T.; Sochor, R.; Merkel, L.; Braunreuther, S.; Schilp, J.: MA²RA – Manual Assembly Augmented Reality Assistant. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Macau, 15.-18.12.2019. New York: IEEE 2019, S. 501-505. ISBN: 9781728138046.

KRÖGER & VIERFUß 2016

Kröger, A.; Vierfuß, R.: Echtzeitfähiges Werkerassistenzsystem für die manuelle Montage 4.0. ZWF 111 (2016) 5, S. 299-301.

LANG 2007

Lang, S.: Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2007). Bamberg: Meisenbach 2007. ISBN: 9783875252576.

LANZA ET AL. 2018

Lanza, G.; Nyhuis, P.; Fisel, J.; Jacob, A.; Nielsen, L.; Schmidt, M.; Stricker, N.: Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie). München: Utz 2018.

LIEDL 2014

Liedl, G.: Materialfluss zur Montage. In: Feldmann, K. et al. (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. München: Carl Hanser 2014, S. 420-432. ISBN: 9783446428270.

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural Complexity Management. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540878889.

LINDNER ET AL. 2017

Lindner, F.; Kostyszyn, K.; Grunert, D.; Schmitt, R.: Smart Devices in der Fertigung. ZWF 112 (2017) 10, S. 662-665.

LOTTER 2012A

Lotter, B.: Einführung. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012, S. 1-8. ISBN: 9783642290602.

LOTTER 2012B

Lotter, B.: Die Primär-Sekundär-Analyse. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012, S. 49-78. ISBN: 9783642290602.

LOTTER 2012C

Lotter, B.: Manuelle Montage von Kleingeräten. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012, S. 109-146. ISBN: 9783642290602.

LUŠIĆ 2017

Lušić, M.: Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2017). Bamberg: Meisenbach 2017. ISBN: 9783875254266. (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke)

LUŠIĆ ET AL. 2016

Lušić, M.; Fischer, C.; Bönig, J.; Hornfeck, R.; Franke, J.: Worker information systems: state of the art and guideline for selection under consideration of company-specific boundary conditions. Procedia CIRP 41 (2016), S. 1113-1118.

MATTSSON ET AL. 2012

Mattsson, S.; Gullander, P.; Harlin, U.; Bäckstrand, G.; Fasth, Å.; Davidsson, A.: Testing Complexity Index – a Method for Measuring Perceived Production Complexity. Procedia CIRP 3 (2012), S. 394-399.

MERHAR ET AL. 2018

Merhar, L.; Berger, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Digitization of Manufacturing Companies: Employee Acceptance Towards Mobile and Wearable Devices. In: Ahram, T. Z. (Hrsg.): Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design. (AHFE 2018). Orlando (Florida), USA, 21.-25.7.2018. Cham: Springer 2019, S. 187-197. ISBN: 9783319946191.

MERKEL ET AL. 2016

Merkel, L.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Digitale Assistenzsysteme in der Kommissionierung. ZWF 111 (2016) 11, S. 687-690.

MERKEL ET AL. 2017A

Merkel, L. ; Starz, J.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Digitale Assistenzsysteme in der Produktion. wt Werkstattstechnik online 107 (2017) 3, S. 124-128.

MERKEL ET AL. 2017B

Merkel, L.; Berger, C.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Application-Specific Design of Assistance Systems for Manual Work in Production. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapur, 10.-13.12.2017. New York: IEEE 2017, S. 1189-1193. ISBN: 9781538609484.

MERKEL ET AL. 2017C

Merkel, L.; Atug, J.; Merhar, L.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Teaching Smart Production: An insight into the Learning Factory for Cyber-Physical Production Systems (LVP). Procedia Manufacturing 9 (2017), S. 269-274.

MERKEL ET AL. 2018A

Merkel, L.; Berger, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Determination of Cognitive Assistance Functions for Manual Assembly. In: Ahram, T. Z. (Hrsg.): Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design. (AHFE 2018). Orlando (Florida), USA, 21.-25.7.2018. Cham: Springer 2019, S. 198-207. ISBN: 9783319946191.

MERKEL ET AL. 2018B

Merkel, L.; Atug, J.; Berger, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Mass Customization and Paperless Assembly in the Learning Factory for Cyber-Physical-Production Systems: Learning Module 'From Paperbased to Paperless Assembly'. In: Chang, M.; Chen, N.; Huang, R.; Kinshuk, Moudgalya, K. M.; Murthy, S.; Sampson, D. G.: 18th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT 2018. Mumbai, Indien, 9.-13.7.2018. New York: IEEE 2018, S. 270-271. ISBN: 9781538660492.

MERKEL ET AL. 2019A

Merkel, L.; Weth, J.; Sochor, R.; Berger, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: A Modular Framework for Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly. In: Dimitrov, D.; Hagedorn-Hansen, D.; von Leipzig, K. (Hrsg.): International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 2019). Stellenbosch, Südafrika, 30.01.-01.02.2019. Stellenbosch: Department of Industrial Engineering, Stellenbosch University, S. 346-351. ISBN: 9780797217799.

MERKEL ET AL. 2019B

Merkel, L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Best Practice Example 19: Lernfabrik für vernetzte Produktion at Fraunhofer IGCV, Augsburg, Germany. In: Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M. (Hrsg.): Learning Factories. Cham: Springer 2019, S. 403-407. ISBN: 9783349922607.

MICHNIEWICZ 2019

Michniewicz, J.: Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2019. ISBN: 9783831648146.

MILBERG & REINHART 1996

Milberg, J.; Reinhart, G.: Produktionssystemplanung. In: Eversheim, W. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996, S. 10-1 - 10-126. ISBN: 9783540593607.

MÜHLENBRUCH 2004

Mühlenbruch, H.: Gestaltungsfelder der Produktionsendstufe - Technologie. In: Wiendahl, H.-P.; Gerst, D.; Keunecke, L. (Hrsg.): Variantenbeherrschung in der Montage. Berlin: Springer 2004, S. 43-65, ISBN: 9783642623721.

MÜLLER 2006

Müller, D.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540321941.

MÜLLER ET AL. 2014

Müller, R.; Vette, M.; Mailahn, O.; Ginschel, A.; Ball, J.: Innovative Produktionsassistenten für die Montage. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 9, S. 552-560.

NEB & STRIEG 2018

Neb, A.; Strieg, F.: Generation of AR-enhanced Assembly Instructions based on Assembly Features. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 1118-1126.

NYHUIS 2018

Nyhuis, P. (Hrsg.): PPS-Report 2017/18. Garbsen: Tewiss 2018. ISBN: 9783959002318. (Berichte aus dem IFA).

NYHUIS ET AL. 2012

Nyhuis et al.: Materialbereitstellung in der Montage. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012, S. 285-313. ISBN: 9783642290602.

OLBRICH 2006

Olbrich, R.: *Marketing*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540235774.

PARASURAMAN & RILEY 1997

Parasuraman, R.; Riley, V.: Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors* 39 (1997) 2, S. 230-253.

PATRON 2004

Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2004. ISBN: 9783831604746. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 190).

PFEIFFER 1989

Pfeiffer, G.: Grenzen der Wirtschaftlichkeit bei der automatisierten Montage. In: *Automatisierung der Montage in der Feinwerktechnik und Elektrotechnik*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN: 9783180907475 (VDI Berichte 747).

PFEIFFER 2007

Pfeiffer, S.: *Montage und Erfahrung*. München: Rainer Hampp 2007. ISBN: 978386181960.

POPPER 1935

Popper, K.: Logik der Forschung. Wien: Springer 1935. ISBN: 9783709120217.

POSTAWA 2014

Postawa, A. B.: Werker-Assistenz und -Qualifizierung für manuelle (De-) Montage durch bild- und schriftgestützte Visualisierung am Arbeitsplatz. Diss. Technische Universität Berlin (2013). Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 9783839607336. (Berichte aus dem produktionstechnischen Zentrum Berlin)

QUIRING 2006

Quiring, Q.: Methodische Aspekte der Akzeptanzforschung bei interaktiven Medientechnologien. Münchener Beiträge zur Kommunikationswissenschaft 6 (2006). <<https://epub.ub.uni-muenchen.de/1348/>> - 16.04.2019.

REFA 1985

REFA: Methodenlehre der Planung und Steuerung Teil 2. 4. Aufl. München: Carl Hanser 1985. ISBN: 978-3446142473.

REINHART & SCHNEIDER 1996

Reinhart, G.; Schneider, B.: Montage. In: Kern, W. et al. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996, S. 1236-1248. ISBN: 9783791080444.

REINHART & ZÜHLKE 2017

Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. XXXI-XL. ISBN: 9783446454583.

REINHART ET AL. 2009

Reinhart, G.; Zäh, M. F.; Wiesbeck, M.; Egbers, J.: Digitale Assistenzsysteme zur alterungsgerechten Integration von Werkern in die variantenreiche Montage. ATZproduktion 2 (2009) 03-04, S. 18-21.

RICHTER AT AL. 2015

Richter, K.; Poenicke, O.; Kirch, M.; Nykolaychuk, M.: Logistiksysteme. In: Schenk, M. (Hrsg.): Produktion und Logistik mit Zukunft. Berlin: Springer 2015, S. 245-281. ISBN: 9783662482650.

RICHTER 2018

Richter, C.: Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2018. ISBN: 9783831647736. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 343).

RODRIGUEZ ET AL. 2015

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. *Procedia Computer Science* 75 (2015), S. 327-333.

SAATY & VARGAS 2012

Saaty, T. L.; Vargas, L. G.: *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. 2. Aufl. New York: Springer 2012. ISBN: 9781461435969.

SAGGIOMO ET AL. 2015

Saggiomo, M.; Lemm, J.; Löhner, M.; Winkel, B.; Gloy, Y.-S.; Gries, T.: Intelligente Assistenzsysteme in der Gewebeproduktion. In: Weidner, R.; Redlich, T.; Wulfsberg, J. P. (Hrsg.): *Technische Unterstützungssysteme*. Berlin: Springer 2015, S. 208-209. ISBN: 9783662483824.

SAMY & ELMARAGHY 2010

Samy, S. N.; ElMaraghy, H.: A model for measuring products assembly complexity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 23 (2010) 11, S: 1015-1027.

SAURO 2011

Sauro, J.: *A Practical Guide to the System Usability Scale*. Denver: Measuring Usability LLC 2011. ISBN: 9781461062707.

SCHENK ET AL. 2016

Schenk, M.; Haase, T.; Keller, A.; Berndt, D.: Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion für die Gestaltung zukünftiger Arbeitssysteme. In: Schlick, C. M. (Hrsg.): *Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation*. Berlin: GITO 2016. ISBN: 9783955451851.

SCHLAGOWSKI ET AL. 2017

Schlagowski, R.; Merkel, L.; Meitinger, C.: Design of an Assistant System for Industrial Maintenance Tasks and Implementation of a Prototype Using Augmented Reality. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapur, 10.-13.12.2017. New York: IEEE 2017, S. 294-298. ISBN: 9781538609484.

SCHUH 2005

Schuh, G.: Produktkomplexität managen. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2005. ISBN: 9783446400435.

SCHWEIZER-RIES ET AL. 2008

Schweizer-Ries, P.; Rau, I.; Zoellner, J.: Akzeptanz Erneuerbarer Energien und sozialwissenschaftliche Fragen. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität 2008. <<https://doi.org/10.2314/GBV:612638286>> – 16.04.2019.

SEITZ ET AL. 2018

Seitz, M.; Härtel, L.; Hübner, M.; Merkel, L.; be Isa, J.; Engehausen, F.; Schmidhuber, M.; Sauermann, F.; Hünnekes, P.: PPS-Report 2017/2018. ZWF 113 (2018) 12, S. 840-844.

SELIGER 2007

Seliger, G.: Montage und Demontage. In: Grobte, K.-H.; Feldhuse, J. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Aufl. Berlin: Springer 2007, S. S 88-S 94. ISBN: 9783540497141.

SIEMONEIT 2010

Siemoneit, O.: Eine Wissenschaftstheorie der Betriebswirtschaftslehre. Diss. Universität Stuttgart (2009). Stuttgart: Institut für Philosophie der Universität Stuttgart 2010.

SOCHOR ET AL. 2019A

Sochor, R.; Riegel, A.; Merhar, L.; Rusch, T.; Merkel, L.; Kerber, F.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Kognitive und physische Assistenz in der Montage. wt Werkstattstechnik online 109 (2019) 3, S. 122-127.

SOCHOR ET AL. 2019B

Sochor, R.; Kraus, L.; Merkel, L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Approach to Increase Worker Acceptance of Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly. Procedia CIRP 81 (2019), S. 926-931.

SPATH ET AL. 2013

Spath, D.; Ganscher, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013. ISBN: 9783839605707. (Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswissenschaft und Organisation IAO).

SPUR & HELLWIG 1986

Spur, G.; Helwig, H.-J.: Einführung in die Montagetechnik. In: Spur, G. et al. (Hrsg.): Handbuch der Fertigungstechnik. München: Carl Hanser 1986, S. 591-606. ISBN: 9783446125360.

STEINBAUER 2012

Steinbauer, C. M. T.: Modell zur Konfiguration der Kleinserienmontage. Diss. Technische Universität München (2012). München: 2012.

STOCKER AT AL. 2017

Stocker, A.; Spitzer, M.; Kaiser, C.; Rosenberger, M.; Fellmann, M.: Datenbrillengestützte Checklisten in der Fahrzeugmontage. Informatik-Spektrum 40 (2017) 3, S. 255-263.

STORK & SCHUBÖ 2010

Stork, S.; Schubö, A.: Human cognition in manual assembly: Theories and applications. Advanced Engineering Informatics 24 (2010), S. 320-328.

SYSKA 2006

Syska, A.: Produktionsmanagement. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2006. ISBN: 9783834902351.

TEUBNER ET AL. 2017

Teubner, S.; Bengler, K.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Intra, C.: Individuelle dynamische Werkerinformationssysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. München: Carl Hanser 2017, S. 66-77. ISBN: 9783446446427.

TEUBNER ET AL. 2019

Teubner, S.; Merkel, L.; Reinhart, G.; Hagemann, F.; Intra, C.: Improving Worker Information – Proposal of a Dynamic and Individual Concept. In: Department of Industrial Engineering Stellenbosch University (Hrsg.): International Conference on Competitive Manufacturing. Stellenbosch, Südafrika, 30.1.2019-1.2.2019. Stellenbosch: Department of Industrial Engineering Stellenbosch University 2019, S. 352-358. ISBN: 9780797217799.

ULICH 2011

Ulich, E.: Arbeitspsychologie. 7. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 2011. ISBN: 9783728133700.

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 5 (1976) 7, S. 304-309.

VAN RANDEN ET AL. 2016

van Randen, H. J.; Fieml, J.; Bercker, C.: Einführung in UML. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016. ISBN: 9783658144111.

VDI 2815

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung: Einführung, Grundlagen. Düsseldorf: Beuth 1978.

VDI 2860

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2860 Blatt 1: Montage- und Handhabungstechnik – Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

VENKATESH & BALA 2008

Venkatesh, V.; Bala, H: Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. Decision Sciences 39 (2008) 2, S. 273-315.

VENKATESH & DAVIS 2000

Venkatesh, V.; Davis, F. D.: A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. Management Science 46 (2000) 2, S. 186-204.

VENKATESH ET AL. 2003

Venkatesh, V.; Morris, M. G.; Davis, G. B.; Davis, F. D.: User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. MIS Quarterly 27 (2003) 3, S. 425-478.

VOGEL & LASCH 2016

Vogel, W.; Lasch, R.: Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review. Logistics Research 9 (2012) 1, S. 1-66.

WAGNER 2016

Wagner, M.: Entwicklung und Überprüfung eines konsolidierten Akzeptanzmodells für Lernmanagementsysteme. Diss. Ludwig-Maximilians-Universität München (2016).

WANDKE 2005

Wandke, H.: Assistance in human-machine interaction: a conceptual framework and a proposal for a taxonomy. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 6 (2005) 2, S. 129-155.

WANG & HU 2010

Wang, H.; Hu, S. J.: Manufacturing complexity in assembly systems with hybrid configurations and its impact on throughput. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 53-56.

WARNECKE 1996

Warnecke, H.-J. (Hrsg.): *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb*. Berlin: Springer 1996. ISBN: 9783642799648.

WEGGE 2004

Wegge, J.: *Führung von Arbeitsgruppen*. Göttingen: Hogrefe 2004. ISBN: 9783801718206.

WERDICH 2012

Werdich, M.: *FMEA – Einführung und Moderation*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2012. ISBN: 9783834817877.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7. Aufl. München: Carl Hanser 2010. ISBN: 9783446418783.

WIESBECK 2014

Wiesbeck, M.: *Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung*. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2004. ISBN: 9783831643691. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 285).

WILDEMANN 2017

Wildemann, H.: *Komplexitätsmanagement*. 18. Aufl. München: TCW 2017. ISBN: 9783931511302.

WILLEKE & KASSELMANN 2016

Willeke, S.; Kasselmann S.: Einführung interaktiver Assistenzsysteme über Reifegradmodelle. ZWF 111 (2016) 11, S. 691-695.

WÖLFLE 2014

Wölfle, M.: Kontextsensitive Arbeitsassistenzsysteme zur Informationsbereitstellung in der Intralogistik. Diss. Technische Universität München (2014). München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. ISBN: 9783941702523.

YANG & PLEWE 2016

Yang, X.; Plewe, D. A.: Assistance Systems in Manufacturing: A Systematic Review. In: Schlick, C.; Trzcieliński, S. (Hrsg.): Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future. International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing (AHFE 2016). Orlando (Florida), USA, 27.-31.7.2016. Basel: Springer 2016, S. 279-289. ISBN: 9783319416960.

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M. F.; Wiesbeck, M.; Engstler, F.; Friesdorf, F.; Schubö, A.; Stork, S.; Bannat, A.; Wallhoff, F.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 9, S. 644-650.

ZÄH ET AL. 2009

Zäh, M. F.; Wiesbeck, M.; Stork, S.; Schubö, A.: A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations. Production Engineering (2009) 3, S. 489-496.

ZELTZER ET AL. 2012

Zeltzer, L.; Limère, V.; Aghezzaf, E.; Van Landeghem, H.: Measuring the Objective Complexity of Assembly Workstations. In: ICGI (Hrsg.): The Seventh International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology. Wilmington: IARIA 2012, S. 341-346. ISBN: 9781612082028.

ZELTZER ET AL. 2013

Zeltzer, L.; Limère, V.; Van Landeghem, H.; Aghezzaf, E.; Stahre, J.: Measuring complexity in mixed-model assembly workstations. International Journal of Production Research 51 (2013) 15. S. 4630-4643.

ZHU ET AL. 2008

Zhu, X.; Hu, S. J.; Koren, Y.; Marin, S. P.: Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 130 (2008) 5.

ZIEGLER 2016

Ziegler, J.: *Wearables im industriellen Einsatz*. Diss. Technische Universität Dresden (2015). Dresden: TUDpress 2016. ISBN: 978359080484.

ZÜHLKE 2012

Zühlke, D.: *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 9783642220739.

11 Anhang

11.1 Fragebogen der partizipativen Technologievorauswahl

Im Folgenden sind die sieben Seiten des Fragebogens der partizipativen Technologievorauswahl abgebildet.

Assistenzsysteme in der Montage

Mit Hilfe Ihrer Einschätzung soll ein passendes Assistenzsystem für die Montage bei SPN entwickelt werden. Im ersten Schritt wollen wir gemeinsam mit Ihnen testen, welche Systeme hinsichtlich der Informationseingabe und -ausgabe geeignet sind. **Alle Angaben werden anonym ausgewertet.**

Der Fragebogen behandelt zwei Kategorien:


- Informationsausgabe (Anleitungen, Hinweise)
- Informationseingabe (Navigation in der Software, Dokumentation von Arbeitsschritten, Abrufen von Hilfestellungen)

Bitte lesen Sie die Erklärungstexte und Fragen genau durch.


Kategorie 1 | Informationsausgabe: Hinweisen und Anleiten

In den folgenden Fragen geht es um die Bereitstellung von Informationen über unterschiedliche Geräte. Das sind zum Beispiel Anleitungen auf einem Touch-Display oder Informationen, wie viele Teile aus welchem Behälter für einen Auftrag entnommen werden sollen (Pick-by-light).

Bitte beantworten Sie zu jeder Komponente die drei Fragen unter dem Bild.

1. Display					
	Informationen über ein Display erhalten				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde das Display einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Display funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z.B. Anleitungen) nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					


2. Pick-by-light über den Beamer



Informationen für das Kommissionieren über einen Beamer erhalten (Pick-by-light)


	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde das Beamer-Pick-by-light-System einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Beamer-Pick-by-light-System funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Kommissionieren nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					


3. Anleitungen über den Beamer



Informationen über eine Projektion auf der Arbeitsfläche

	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde die Anleitungen über den Beamer einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Beamer-System für Anleitungen funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z.B. Anleitungen) nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

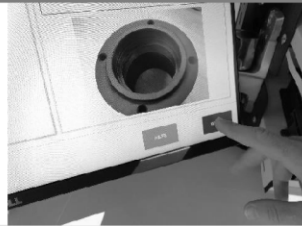
4. Anleitung über Lautsprecher					
	Informationen über einen Lautsprecher				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde die Informationsbereitstellung über einen Lautsprecher einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Informationsbereitstellung über einen Lautsprecher funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z.B. Anleitungen) nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					


5. Anleitung über Headset					
	Informationen über ein Headset				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde die Informationsbereitstellung über ein Headset einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Informationsbereitstellung über ein Headset funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z.B. Anleitungen) nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

Kategorie 2 | Informationseingabe: Dokumentieren und navigieren (blättern, auswählen)


Die folgenden Fragen drehen sich um die Eingabe von Informationen über unterschiedliche Geräte. Das kann das Vor- und Zurückblättern in einer digitalen Anleitung sein oder zum Beispiel das Abrufen von zusätzlichen Informationen oder Hilfen.

Bitte beantworten Sie zu jeder Komponente die drei Fragen unter dem Bild.


1. Touch-Eingabe am Display					
	Per Touch ein Display bedienen (z.B. blättern, Informationen abrufen und eingeben, dokumentieren etc.)				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde die Touchfunktion am Display einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Touchdisplay funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Dokumentieren und Navigieren (z.B. Anleitungen) nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

2. Spracheingabe					
	Navigieren und Hilfestellung über Sprachsteuerung				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde die Sprachsteuerung einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Sprachsteuerung funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Navigieren und für Hilfestellungen nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

3. Navigieren über Myo-Armband					
	Navigieren (Blättern) über das Myo-Armband				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde das Myo-Armband einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Navigieren mit dem Myo-Armband funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Navigieren nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

4. Navigieren über Kinemic-Armband					
	Navigieren (Blättern) über das Kinemic-Armband				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde das Kinemic-Armband einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Navigieren mit dem Kinemic-Armband funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Navigieren nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

5. Navigieren über Leap Motion (Gestenerkennung)					
	Navigieren (Blättern) über Gestensteuerung mit Leap Motion				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde das Leap Motion einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Navigieren mit Leap Motion funktioniert zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte das System gerne zum Navigieren nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

6. Navigieren über Buttons					
	Navigieren (Blättern) mit Buttons				
	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
Ich finde die Buttons einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Buttons funktionieren zuverlässig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte die Buttons gerne zum Navigieren nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:					

Wie geht es weiter?

Im nächsten Schritt entwickeln wir Beispielsysteme, die dann wieder getestet werden. Hier können Sie uns mit Ihren Wünschen unterstützen:

Wie sollen Informationen und Anleitungen gestaltet und dargestellt werden?
Was sollte das System neben der Bereitstellung von Informationen noch können?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Bei Rückfragen oder Anregungen wenden Sie sich gerne an das Team vom Fraunhofer IGCV.

11.2 Komplexitätsbewertung der Validierung

Im Folgenden werden die in Workshops bewerteten Einzelkomplexitäten sowie die daraus berechneten Komplexitätsdimensionen der ausgewählten Prozessschritte dargestellt.

Prozessschritt	MQ	IG	AEF	SH	AW	EW	DB	IW	DA
Sicherungsring montieren	9	1	1	8	3	5	3	2	4
	WK=9			DK=120			DOK=24		
Lager aufpressen	8	5	1	8	12	2	2	2	4
	WK=40			DK=192			DOK=16		
Planetenträger in Gehäuse einfahren	7	1	1	8	2	2	2	2	4
	WK=7			DK=32			DOK=16		
Baugruppe auf Presstisch aufsetzen	8	1	1	5	2	2	3	1	4
	WK=8			DK=20			DOK=12		
Zweites Lager am Innenring aufpressen	8	1	1	8	3	2	5	2	4
	WK=8			DK=48			DOK=40		
Sicherungsring montieren	9	5	1	10	5	24	4	4	4
	WK=45			DK=200			DOK=64		
Scheibe einlegen	9	10	8	10	6	8	8	8	6
	WK=720			DK=480			DOK=384		
Planetenräder mit Benadelungsgerät einbringen	7	5	5	10	5	3	2	4	4
	WK=175			DK=150			DOK=32		
Planetenräder befetten	9	1	5	5	4	4	3	3	4
	WK=45			DK=80			DOK=36		
Planetenrad aufsetzen	8	1	1	10	1	2	4	2	4
	WK=8			DK=20			DOK=32		
1. Stufe fetten	9	1	5	8	3	4	3	5	4
	WK=45			DK=96			DOK=60		
Stahlscheibe auflegen	9	10	8	10	6	8	5	8	4
	WK=720			DK=480			DOK=160		

11.3 Fragebogenergebnisse der Validierung

Im Folgenden sind die Fragebogenergebnisse partizipativen Technologievorauswahl im Rahmen der Validierung der Methode dargestellt. Hierbei wurden die Komponenten am mobilen Montagearbeitsplatz von 19 Teilnehmer erprobt.

	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	teils/teils	stimme eher zu	stimme voll zu
	1	2	3	4	5
Komponente und zu bewertende Aussage	Anzahl der Bewertungen der Teilnehmer				
Display					
Ich finde das Display einfach zu benutzen.	0	0	1	6	12
Das Display funktioniert zuverlässig.	0	0	1	5	13
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z. B. Anleitungen) nutzen.	0	0	1	9	9
Pick-by-Light Beamer					
Ich finde das Beamer-Pick-by-Light-System einfach zu benutzen.	0	0	0	6	13
Das Beamer-Pick-by-Light-System funktioniert zuverlässig.	0	0	2	3	14
Ich möchte das System gerne zum Kommissionieren nutzen.	0	1	2	4	12
Anleitungen über Beamer					
Ich finde die Anleitungen über den Beamer einfach zu benutzen.	0	1	3	5	10
Das Beamer-System funktioniert zuverlässig.	0	1	2	6	10
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z. B. Anleitungen) nutzen.	0	2	3	8	6
Anleitungen über Lautsprecher					
Ich finde die Informationsbereitstellung über einen Lautsprecher einfach zu benutzen.	5	3	5	3	3
Die Informationsbereitstellung über einen Lautsprecher funktioniert zuverlässig.	3	2	4	7	3
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z. B. Anleitungen) nutzen.	7	2	9	0	1
Anleitungen über Headset					

Anhang

Ich finde die Informationsbereitstellung über ein Headset einfach zu benutzen.	4	2	5	2	6
Die Informationsbereitstellung über ein Headset funktioniert zuverlässig.	3	4	5	4	3
Ich möchte das System gerne zum Erhalten von Informationen (z. B. Anleitungen) nutzen.	6	4	4	1	4
Touch-Display					
Ich finde die Touchfunktion am Display einfach zu benutzen.	0	0	2	3	14
Das Touchdisplay funktioniert zuverlässig.	0	0	3	1	15
Ich möchte das System gerne zum Dokumentieren und Navigieren (z. B. Anleitungen) nutzen.	0	0	0	6	13
Spracheingabe					
Ich finde die Sprachsteuerung einfach zu benutzen.	4	0	6	5	4
Die Sprachsteuerung funktioniert zuverlässig.	4	1	5	6	3
Ich möchte das System gerne zum Navigieren und für Hilfestellungen nutzen.	6	4	4	3	2
Myo-Armband (n=18)					
Ich finde das Myo-Armband einfach zu benutzen.	5	5	6	2	0
Navigieren mit dem Myo-Armband funktioniert zuverlässig.	5	6	4	2	1
Ich möchte das System gerne zum Navigieren nutzen.	6	6	4	2	0
Leap Motion					
Ich finde das Leap Motion einfach zu benutzen.	2	6	7	2	2
Navigieren mit Leap Motion funktioniert zuverlässig.	3	8	4	2	2
Ich möchte das System gerne zum Navigieren nutzen.	6	7	3	2	1
Buttons					
Ich finde die Buttons einfach zu benutzen.	0	0	2	5	12
Die Buttons funktionieren zuverlässig.	0	0	1	5	13
Ich möchte die Buttons gerne zum Navigieren nutzen.	0	1	2	7	9

11.4 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Promotion sind zwischen 2016 und 2019 die folgenden studentischen Arbeiten unter wissenschaftlicher Anleitung des Autors entstanden:

- Angerer, Cajetan: Entwicklung einer Methode zur Bewertung des Unterstützungsbedarfs durch digitale Assistenzsysteme in der Produktion (Masterarbeit, Technische Universität München)
- Kowalski, Stephan: Entwicklung einer Methode zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Assistenzsystemen in der Produktion (Masterarbeit, Technische Universität München)
- Schmitt, Michael: Evaluation of Digitalization Potentials in Aircraft Final Assemblies (Masterarbeit, Technische Universität München)
- Seiter, Simon: Entwicklung einer Toolbox zur Auswahl digitaler Assistenzsysteme in der Kommissionierung am Beispiel einer Industrie 4.0 Lernfabrik (Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg)
- Starz, Janek: Entwicklung eines Fähigkeitenmodells für digitale Assistenzsysteme (Semesterarbeit, Technische Universität München)
- Weth, Johannes: Methodische Generierung alternativer Assistenzsysteme in der manuellen Montage (Semesterarbeit, Technische Universität München)
- Zietsch, Jakob: Entwicklung eines Anforderungsmodells für digitale Assistenzsysteme in der Produktion (Masterarbeit, Technische Universität München)