

Nutzerzentrierte Gestaltung einer GUI für die mobile Mensch-
Roboter-Kooperation an Montagearbeitsplätzen:
Integration von Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und
intuitiver Roboterprogrammierung

Von der Fakultät für Architektur der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt

von

Christian Colceriu

Berichtende: Univ.-Prof. Dr. techn. Sigrid Brell-Cokcan
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch

Tag der mündlichen Prüfung: 22.07.2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Danksagung

Die Promotion ist eine unglaubliche Erfahrung, ein Erlebnis und eine Erkenntnis, die sich aus vielen Komponenten zusammensetzt und – wie der Inhalt dieser Arbeit – ein ganzheitliches Konstrukt ergibt. Die wichtigsten Komponenten der Wissenschaft sind die Menschen, ohne die diese Arbeit niemals hätte entstehen können. Und alle hier genannten Personen haben zu dieser Arbeit beigetragen, wofür ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

An erster Stelle gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch, die meine Forschung fachlich betreut hat. Ihre Professionalität und Offenheit für Interdisziplinarität und neue Themen ermöglichten einen wertvollen Austausch. Ihre gute Erreichbarkeit und Zuverlässigkeit waren eine große Unterstützung und haben meine Arbeit vorangebracht.

Des Weiteren danke ich meiner Betreuerin Prof. Dr. techn. Sigrid Brell-Cokcan für die organisatorische und fachliche Unterstützung, damit mein Thema und die Designdisziplin auch an der dafür geeigneten Fakultät ihren Platz gefunden haben.

Ich danke meinen Forschungskolleginnen und -kollegen, die mich als Co-Autorinnen und Co-Autoren beraten und meine Publikationen durch den fachlichen Austausch unterstützt haben. Darunter Dr. phil. Benedikt Leichtmann für Erkenntnisse aus der Psychologie, Dr. rer. nat. Michael Riedl und Prof. Dr. Dominik Henrich für Einblicke in die angewandte Informatik. Prof. Dr. Wolfgang Jonas danke ich für die Wissensvermittlung über Designforschung und Dr.-Ing. Sabine Theis für den Austausch zum Thema Human Factors. Mein Dank gilt auch Dr. phil. Katharina Schäfer für den Wissenstransfer zur qualitativen Forschung.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen bei Krones bedanke ich mich ebenso, die mich bei der Durchführung der Studien unterstützt haben, sei es durch die Mitprotokollierung oder die Teilnahme an Interviews, sei es durch die fachliche Unterstützung bei Expert Reviews oder die Teilnahme an User Tests.

Ich danke der Bayerischen Forschungstiftung für die Förderung des Forschungsverbundprojekts *FORobotics* und den Projektbeteiligten sowohl für die Organisation als auch für die Bereitstellung der technischen Mittel.

Ich möchte mich auch bei den Menschen bedanken, die Design als eine Disziplin sehen, die Produkte behübscht. Sie haben mir den Anstoß zu meiner Promotion gegeben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie für den Rückhalt und die mentale Unterstützung auf dieser Reise durch die Welt der Wissenschaft. In den letzten vier Jahren habe ich zu schätzen gelernt, dass eine Promotion nur mit viel Geduld und Rückenwind von außen gelingen kann.

Danksagung

Deshalb widme ich diese Arbeit dem besonderen Menschen in meinem Leben, dem auch mein Herz gehört.

Für Doris

Zusammenfassung

Die mobile Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) ist ein relativ neues Technologiefeld, bei dem menschliche Faktoren wie Technikakzeptanz und Gebrauchstauglichkeit eine wichtige Rolle spielen. Nutzerzentrierte Gestaltung ist ein Ansatz, der Produkte hervorbringen kann, die mit größerer Wahrscheinlichkeit von den Nutzenden akzeptiert werden. Daher sollten die Benutzungsschnittstellen zwischen Mensch und Roboter nutzerzentriert gestaltet werden. Dies umfasst das gesamte Spektrum der Interaktion, von der gemeinsamen Durchführung der Arbeitsaufgabe bis hin zur spontanen Programmierung des Roboters durch das Montagepersonal.

Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Untersuchung eines ganzheitlichen Ansatzes zur nutzerzentrierten Gestaltung einer grafischen Benutzungsschnittstelle (GUI) für die mobile MRK an Montagearbeitsplätzen. Dazu werden auf Basis der drei Konstrukte Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung in mehreren Iterationen Methoden zur Analyse, Gestaltung und Evaluierung der GUI durchgeführt. Durch ein interdisziplinäres, theoretisches Rahmenwerk aus den Bereichen Arbeitswissenschaft, Betriebswissenschaft, Human Factors und UX-Design wurde ein Vorgehensmodell entwickelt, das zu guten Ergebnissen in Bezug auf die drei untersuchten Konstrukte führt. Die Messung des Situationsbewusstseins hat einen Wert von $M=0.83$ ($SD=0.20$) ergeben, bei einem möglichen Maximalwert von 1. Die Gebrauchstauglichkeit ist mit $M=1.8$ ($SD=0.77$) bewertet worden, auf einer Skala von -3 bis +3. Bei der Messung der Intuitivität hat sich ein QUESI-Wert von $M=3.7$ ($SD=0.8$) ergeben, bei einem möglichen Maximalwert von 5.

Durch die Integration verschiedener theoretischer Konzepte, bekannter Entwicklungsansätze und empirischer Evaluation wurden neue Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendung von Methoden zur Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für die mobile MRK in der Montagearbeit entwickelt, die Gebrauchstauglichkeit und Situationsbewusstsein fördern und intuitiv programmierbar sind.

Summary

Mobile human-robot cooperation (HRC) is a relatively new technological field where human factors such as technology acceptance and usability play an important role. User-centered design is an approach that can produce products that are more likely to be accepted by users. Therefore, the user interfaces between humans and robots should be designed in a user-centered way. This includes the whole spectrum of interaction, from the joint execution of the work task to the spontaneous programming of the robot by the assembly personnel.

This dissertation deals with the investigation of a holistic approach to the user-centered design of a graphical user interface (GUI) for mobile MRK at assembly workstations. For this purpose, methods for the analysis, design and evaluation of the GUI are carried out in several iterations based on the three constructs of situation awareness, usability and intuitive use. Through an interdisciplinary, theoretical framework from the fields of industrial engineering, industrial management, human factors and UX design, a procedure model was developed that leads to good results in terms of the three constructs investigated. The measurement of situation awareness resulted in a value of $M=0.83$ ($SD=0.20$), with a possible maximum value of 1. Usability was rated with $M=1.8$ ($SD=0.77$), on a scale from -3 to +3. The measurement of intuitiveness resulted in a QUESI score of $M=3.7$ ($SD=0.8$), with a possible maximum score of 5.

By integrating different theoretical concepts, known development approaches and empirical evaluation, new insights have been developed regarding the application of methods for the design of user interfaces for mobile HRC in assembly work that promote usability and situation awareness and are intuitively programmable.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Zusammenfassung	VI
Summary	VII
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Kontext der Forschung	1
1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung	5
1.3 Übersicht über die Struktur der Arbeit	6
2 Theoretischer Rahmen	9
2.1 Theorien und Konzepte zur Mensch-Roboter-Kooperation	9
2.1.1 MRK-Klassifizierung	9
2.1.2 Arbeitssysteme	12
2.1.3 Montageformen	14
2.1.4 Interaktionsformen und Sinnesmodalitäten	14
2.2 Nutzerzentrierte Gestaltungsansätze	17
2.2.1 Situationsbewusstsein	17
2.2.2 Gebrauchstauglichkeit	19
2.2.3 Intuitive Nutzung	21
2.2.4 Contextual Design	24
2.2.5 Research through Design	25
2.2.6 Weitere Gestaltungsansätze	25
2.3 Literaturrecherche zum Stand der Forschung	27
2.4 Verknüpfung von Anwendungskontext und theoretischem Rahmen	31

2.5	Verknüpfung von Gestaltungsprozess und theoretischem Rahmen	32
3	Studie 1: Situationsbewusstsein für die mobile MRK	36
3.1	Hintergrund.....	36
3.2	Verwandte Arbeiten.....	39
3.3	Motivation und Forschungsfrage.....	41
3.4	Methodik.....	41
3.4.1	Methode der GDTA	42
3.4.2	Methode des Physical Models.....	44
3.4.3	Methode des Wireframe Designs	45
3.4.4	Methode der qualitativen Befragung zum Situationsbewusstsein.....	46
3.4.5	Methode der quantitativen Studie zur Messung des Situationsbewusstseins.....	46
3.5	Ergebnisse.....	48
3.5.1	Ergebnis der Goal-Directed Task Analysis	48
3.5.2	Ergebnis des Physical Models.....	51
3.5.3	Ergebnis des Wireframe Designs	54
3.5.4	Ergebnis der qualitativen Befragung zum Situationsbewusstsein.....	59
3.5.5	Ergebnis der quantitativen Studie angelehnt an SAGAT.....	60
3.6	Ableitung einer Methodenkombination.....	61
3.6.1	Beschreibung der Methodenkombination	61
3.6.2	Validierung der Methodenkombination	62
3.6.3	Ergebnisse der Validierung	63
3.7	Diskussion	65
3.7.1	Interpretation der Ergebnisse	65
3.7.2	Limitationen	67
4	Studie 2: Gebrauchstauglichkeit für die mobile MRK.....	68
4.1	Hintergrund.....	68
4.2	Verwandte Arbeiten.....	69
4.3	Motivation und Forschungsfrage.....	70

4.4	Methodik.....	71
4.4.1	Experimentelle Aufgabe.....	71
4.4.2	Methode der quantitativen Studie für Eingabemodalitäten.....	73
4.4.3	Methode der qualitativen Befragung zu Touch-Interfaces.....	74
4.4.4	Methode der Gestaltung interaktiver Mockups	75
4.4.5	Methode der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen	75
4.4.6	Methode des Usability-Tests mit Endnutzenden.....	76
4.5	Ergebnisse.....	76
4.5.1	Ergebnis der quantitativen Studie für Eingabemodalitäten.....	76
4.5.2	Ergebnis der qualitativen Befragung zu Touch-Interfaces.....	77
4.5.3	Ergebnis der Gestaltung des interaktiven Mockups	79
4.5.4	Ergebnis der Gestaltung des High Fidelity Mockups.....	88
4.5.5	Ergebnis der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen	90
4.5.6	Ergebnis des Usability-Tests mit Endnutzenden.....	91
4.6	Diskussion	92
4.6.1	Interpretation der Ergebnisse	92
4.6.2	Limitationen	95
5	Studie 3: Intuitive Roboterprogrammierung	96
5.1	Hintergrund.....	96
5.2	Verwandte Arbeiten.....	97
5.3	Motivation und Forschungsfrage.....	98
5.4	Methodik.....	98
5.4.1	Experimentelle Aufgabe.....	99
5.4.2	Methode der quantitativen Studie zu Softwarekenntnissen	100
5.4.3	Methode der Produktanalyse von Editiersoftware	100
5.4.4	Methode der Gestaltung von Papierprototyp und interaktives Mockup.....	101
5.4.5	Methode der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen	102
5.4.6	Methode des Tests zur intuitiven Nutzung mit Endnutzenden.....	102

5.5	Ergebnisse.....	104
5.5.1	Ergebnis der quantitativen Studie zu Softwarekenntnissen	104
5.5.2	Ergebnis der Produktanalyse von Editiersoftware	105
5.5.3	Ergebnis der Gestaltung des Papierprototyps.....	106
5.5.4	Ergebnis der Gestaltung des interaktiven Mockups	107
5.5.5	Ergebnis der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen	110
5.5.6	Ergebnis des Tests zur intuitiven Nutzung mit Endnutzenden.....	110
5.6	Diskussion	112
5.6.1	Interpretation der Ergebnisse	112
5.6.2	Limitationen	113
6	Ganzheitlicher Ansatz: Nutzerzentrierte Gestaltung einer GUI für die mobile MRK... ..	115
6.1	Ausgangssituation und Ziel	115
6.2	Prozessmodell für Situationsbewusstsein.....	115
6.3	Prozessmodell für Gebrauchstauglichkeit	117
6.4	Prozessmodell für intuitive Nutzung	118
6.5	Ganzheitlicher Prozess für nutzerzentrierte Gestaltung	120
7	Gesamtdiskussion und Schlussfolgerung	122
7.1	Gesamtdiskussion	122
7.1.1	Diskussion des theoretischen Rahmens für mobile MRK.....	122
7.1.2	Diskussion des theoretischen Rahmens für eine nutzerzentrierte Gestaltung..	123
7.1.3	Interpretation der Ergebnisse zu Situationsbewusstsein	125
7.1.4	Interpretation der Ergebnisse zu Gebrauchstauglichkeit.....	126
7.1.5	Interpretation der Ergebnisse zur intuitiven Roboterprogrammierung	127
7.1.6	Beantwortung der Forschungsfragen	128
7.1.7	Allgemeine Limitationen.....	129
7.2	Fazit	132
7.3	Ausblick.....	133
8	Literaturverzeichnis.....	135

9	Anhang	147
9.1	Anhang zu Studie 1: Situationsbewusstsein für die mobile MRK (Kap. 3)	147
9.1.1	Fragebogen zur qual. Befragung für Situationsbewusstsein (Kap. 3.4.4)	147
9.1.2	Leitfaden der quantitativen Studie zur Messung von SA (Kap. 3.4.5)	148
9.1.3	Bewertungsbogen der quant. Studie zur Messung von SA (Kap. 3.4.5)	150
9.2	Anhang zu Studie 2: Gebrauchstauglichkeit für die mobile MRK (Kap. 4)	151
9.2.1	Bewertungsbogen zur quant. Studie für Eingabemodalitäten (Kap. 4.4.2)	151
9.2.2	Leitfaden zum Usability Test mit Endnutzenden (Kap. 4.4.6)	152
9.2.3	Ergebnisse der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen (Kap. 4.4.5)	153
9.2.4	Ansichten des High Fidelity Mockups (Kap. 4.5.4)	156
9.3	Anhang zu Studie 3: Intuitive Roboterprogrammierung (Kap. 5)	158
9.3.1	Ansichten des Papierprototyps (Kap. 5.5.3)	158
9.3.2	Ansichten des interaktiven Mockups (Kap. 5.5.4)	159

Abkürzungsverzeichnis

AE	American English
ASAGAT	Short Post-Assessment of Situation Awareness
BE	British English
CARS	Crew Awareness Rating Scale
Cobot	Collaborative Robot
GDTA	Goal-Directed Task Analysis
GUI	Graphical User Interface
HRC	Human-Robot Cooperation
HRI	Human-Robot Interaction
IUUI	Intuitive Use of User Interfaces
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
MRI	Mensch-Roboter-Interaktion
PASA	Post Assessment of Situation Awareness
QASAGAT	Quantitative Analog Situation Awareness Global Assessment Technique
SA	Situation Awareness
SAGAT	Situation Awareness Global Assessment Technique
SART	Situation Awareness Rating Technique
SPASA	Short Post Assessment of Situation Awareness
UX	User Experience

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	<i>Prognostizierte Entwicklung des Marktvolumens für kollaborative Roboter</i>	2
Abbildung 2	<i>Demonstrator des mobilen, kollaborativen Roboters</i>	3
Abbildung 3	<i>Übersicht über die Thematik der vorliegenden Forschung</i>	4
Abbildung 4	<i>Struktur der Dissertation</i>	8
Abbildung 5	<i>Einteilung der Roboterelemente</i>	10
Abbildung 6	<i>Auswahl an Fähigkeiten</i>	11
Abbildung 7	<i>Vier Grade der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Cobot</i>	12
Abbildung 8	<i>Arbeitssystem der mobilen MRK für Montageanwendungen</i>	13
Abbildung 9	<i>Übersicht über Möglichkeiten der Informationsverarbeitung bei der MRI</i>	15
Abbildung 10	<i>Parameter für Produktgestalten von Robotern und GUIs</i>	16
Abbildung 11	<i>Auflistung von Interaktionselementen für GUIs</i>	17
Abbildung 12	<i>Methoden zur nutzerzentrierten Gestaltung für Situationsbewusstsein</i>	19
Abbildung 13	<i>Gestaltungsempf. und Evaluierungsmethoden für Gebrauchstauglichkeit</i>	21
Abbildung 14	<i>Beispiele für Methoden zur Gestaltung und Evaluierung</i>	24
Abbildung 15	<i>Methoden zur Gestaltung für Contextual Design</i>	25
Abbildung 16	<i>Anwendungskontext und Zusammenhänge zwischen einzelnen Faktoren</i>	32
Abbildung 17	<i>Überschneidung der Gestaltungsprinzipien bei den Konstrukten Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung</i>	34
Abbildung 18	<i>Nutzerzentrierter iterativer Gestaltungsprozess</i>	35
Abbildung 19	<i>Die Gestaltung für Situationsbewusstsein ist notwendig</i>	39
Abbildung 20	<i>Teilnehmende Beobachtung bei der Durchführung der Arbeitsaufgabe</i>	43
Abbildung 21	<i>Interview-Leitfaden der durchgeführten Einzelinterviews</i>	44
Abbildung 22	<i>Evaluierungs-Setup des kontrollierten Experiments</i>	47
Abbildung 23	<i>Beispiel für die Berechnung des Situationsbewusstseins</i>	48
Abbildung 24	<i>Primäre Zielhierarchie</i>	50
Abbildung 25	<i>Sekundäre Zielhierarchie</i>	51
Abbildung 26	<i>Strukturierung der Elemente zur Erstellung des Physical Models</i>	52
Abbildung 27	<i>Physical Model mit Soll- und Ist-Informationen</i>	53
Abbildung 28	<i>Wireframe-Design des Fortschritts der Gesamtmission</i>	55
Abbildung 29	<i>Wireframe-Design zeigt das Gesamtziel</i>	56
Abbildung 30	<i>Wireframe-Design zeigt die aktuelle Tätigkeit des Roboters</i>	57
Abbildung 31	<i>Wireframe-Design zeigt die zu prüfenden Arbeitsschritte</i>	58
Abbildung 32	<i>Zusammenhänge zwischen angewandten Methoden</i>	59

Abbildung 33	<i>Ergebnisse der qual. Evaluierung des Wireframes mit Endnutzenden</i>	60
Abbildung 34	<i>Ergebnisse der Messungen von Situationsbewusstsein und Performance</i>	61
Abbildung 35	<i>Ansatz einer Methodenkombination</i>	62
Abbildung 36	<i>Beispiele für GUI-Designs</i>	64
Abbildung 37	<i>Ergebnis der Validierung des Designprozesses mit Studierenden</i>	65
Abbildung 38	<i>Elemente und Ressourcen für Abfolge der Arbeitsaufgaben</i>	72
Abbildung 39	<i>Eingabemodalitäten, die bei der quantitativen Studie zur Auswahl stehen</i>	74
Abbildung 40	<i>Ergebnis der Erhebungen zu den Eingabemodalitäten</i>	77
Abbildung 41	<i>Ergebnis der qualitativen Befragung zu Touch-Systemen</i>	79
Abbildung 42	<i>Bedien- und Anzeigeelemente der GUI</i>	85
Abbildung 43	<i>Gesamtziel der Montageeinheit</i>	86
Abbildung 44	<i>Status des Roboters in Bezug auf seine aktuelle Tätigkeit</i>	87
Abbildung 45	<i>Checkliste zur Überprüfung der korrekten Ausführung</i>	88
Abbildung 46	<i>Zweite Iteration des GUI-Designs</i>	89
Abbildung 47	<i>Zweite Iteration des GUI-Designs - Roboterstatus</i>	90
Abbildung 48	<i>Ergebnis des Usability-Tests und Gewichtung der Prinzipien</i>	92
Abbildung 49	<i>Experimentelle Aufgabe</i>	99
Abbildung 50	<i>Experimentelle Aufgaben zur Eval. des Roboterprogrammiersystems</i>	100
Abbildung 51	<i>Evaluationssetup für User Tests der Roboterprogrammierung</i>	104
Abbildung 52	<i>Entwurf des Papierprototyps</i>	107
Abbildung 53	<i>Programmiermodus des Designs für das interaktive Mockup</i>	110
Abbildung 54	<i>Ergebnisse der Evaluierung mit dem MINERIC Toolkit</i>	111
Abbildung 55	<i>Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für Situationsbewusstsein</i>	116
Abbildung 56	<i>Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für Gebrauchstauglichkeit</i>	118
Abbildung 57	<i>Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess zur intuitiven Roboterprogrammierung</i>	119
Abbildung 58	<i>Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für die mobile MRK mit Fokus auf Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Roboterprogrammierung</i>	121
Abbildung 59	<i>Darstellung der gesamten Thematik dieser Forschung</i>	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 <i>Literaturrecherche verwandter Arbeiten</i>	29
Tabelle 2 <i>Kodierleitfaden für die qualitative Befragung</i>	78
Tabelle 3 <i>Gestaltungsprinzipien der ISO 9241-110 bezogen auf die GUI</i>	80
Tabelle 4 <i>Gestaltungsprinzipien der ISO 9241-112 bezogen auf die GUI</i>	82
Tabelle 5 <i>Gestaltungsprinzipien der ISO 9241-13 bezogen auf die GUI</i>	83
Tabelle 6 <i>Ergebnisse der quantitativen Befragung zu Programmier-Erfahrung und Kenntnisse über Editiersysteme</i>	105

1 Einleitung

„Gegenwärtig konkurriert die Maschine mit dem Menschen. Unter richtigen Verhältnissen wird sie dem Menschen dienen“ (Oscar Wilde, 1891).

Um innovative Entwicklungen in der Robotik frühzeitig für den Menschen, der damit arbeiten soll, gebrauchstauglich zu gestalten, ist es notwendig, den Menschen, der diese Technik nutzt, frühzeitig einzubeziehen. Vor diesem Hintergrund thematisiert die vorliegende wissenschaftliche Arbeit den nutzerzentrierten¹ Gestaltungsprozess für die mobile Mensch-Roboter-Kooperation (MRK).

1.1 Hintergrund und Kontext der Forschung

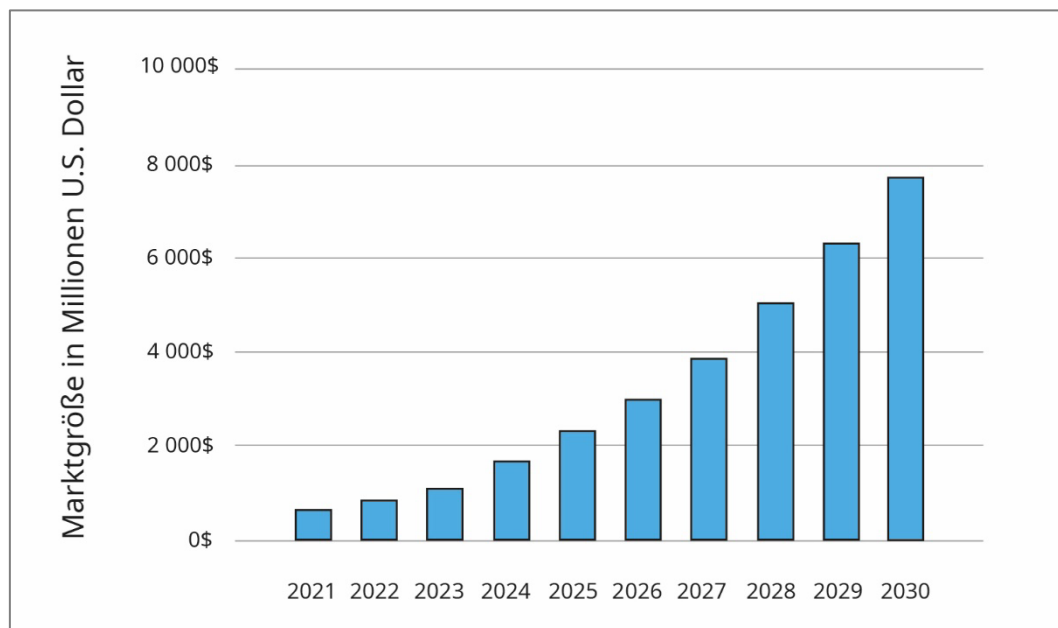
Globale Herausforderungen wie der demografische Wandel (Acemoglu & Restrepo, 2018), die Corona-Pandemie (Pertschy, 2021) (Fries, et al., 2020) und die Konkurrenz aus Niedriglohnländern (Thomas, Kuhlenkötter, & Klöckner, 2014) führen zu einem hohen Fachkräftemangel bei steigender Komplexität in Produktion und Bauwesen (Wahl-Immel, 2021) (DIHK, 2021). Dies führt zu einem verstärkten Einsatz von Robotern in der Zusammenarbeit mit dem Menschen (Kremer, Hermann, Henkel, & Fraunhofer, 2018) (Muetze-Niewoehner & Nitsch, 2020) (Meyer-Veltrup, 2021). Bis zum Jahr 2030 wird ein Marktvolumen für kollaborative Roboter von 7.7 Milliarden US-Dollar erwartet. Im Vergleich dazu lag das Marktvolumen im Jahr 2021 bei 0.7 Mrd. US-Dollar (Thormundsson, 2023). Abbildung 1 zeigt die Entwicklung des Marktvolumens auf.

Bei der Gestaltung von Schnittstellen zwischen Menschen und assistiven Technologien hat sich vor allem der menschenzentrierte Gestaltungsansatz bewährt. Während die technologieorientierte Gestaltungsphilosophie eine Abwärtsspirale von Komplexität und Fehleranfälligkeit erzeugt, da mit der Anzahl der technischen Funktionen auch die Anzahl der Informationsanzeigen steigt, führt die menschenzentrierte Gestaltungsphilosophie zu Benutzungsschnittstellen, die die Fähigkeiten und Bedürfnisse der Menschen berücksichtigen (Endsley et al., 2003). Mögliche Schnittstellen sind grafische Benutzungsschnittstellen (Elkmann, Berndt, Leye, Richter, & Mecke, 2015).

¹ Der Begriff *nutzerzentriert* wird in dieser Arbeit nicht gegendert, sondern wie in der DIN EN ISO 9241-210 verwendet, da es keine offizielle gegenderte Bezeichnung gibt. Ebenso wird er im Gegensatz zur menschenzentrierten Gestaltung verwendet, da der Fokus auf den Menschen liegt, der das Objekt nutzt, im Gegensatz zu den Menschen, die z.B. beim Kauf mit dem Objekt in Kontakt kommen.

Abbildung 1

Prognostizierte Entwicklung des Marktvolumens für kollaborative Roboter 2021-2030



Anmerkung. Adaptiert aus “Global mobile cobots market size 2021-2030“ von Thormundsson, B., 2023, <https://www.statista.com/statistics/1378950/mobile-cobots-market-value/>

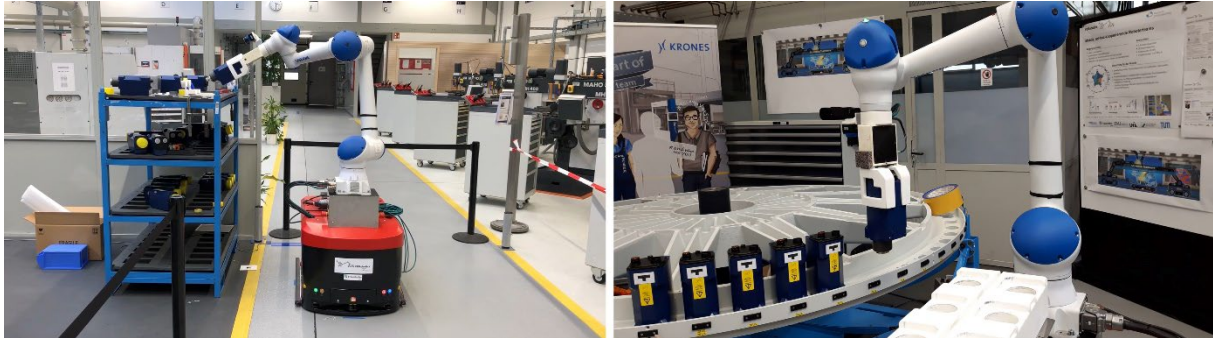
In kooperierenden Tätigkeiten zwischen Menschen und Roboter sind Designende und Entwickelnde immer wieder mit der Tatsache konfrontiert, dass wenig darüber geforscht wurde, wie man von abstrakten Designempfehlungen zu konkreten Designimplementierungen, bezogen auf eine GUI für die MRK kommt. Während in der Robotik vorgefertigte Designelemente in Evaluationen verglichen werden, fehlt es vor allem an Forschung zum Designprozess selbst (Lupetti, Zaga, & Cila, 2021). Insbesondere einfach zu bedienende Schnittstellen werden immer wichtiger, da sie die Akzeptanz von automatisierten Systemen bei den Nutzern erhöhen (Leichtmann, Nitsch, & Mara, 2022; Thomas, Kuhlenkötter, & Klöckner, 2014).

Ein Beispiel für eine unterstützende Robotertechnologie für den Einsatz an Montage- und Lagerarbeitsplätzen ist die mobile Roboterplattform des Forschungsverbundes *FORobotics* (Berger, et al., 2021), in dessen Rahmen auch die vorliegende Arbeit entstanden ist. Dabei sollen Fähigkeiten verschiedener Roboter Teams vereint werden, um als Ziel die Produktivität in der Industrie zu steigern. Teilprojekte wie die Mensch-Roboter-Interaktion und die empirische Nutzerevaluation setzen Schwerpunkte, die eine menschenzentrierte Gestaltung

essenziell macht. Abbildung 2 zeigt den Demonstrator für den mobilen, kollaborativen Roboter beim Durchführen der exemplarischen Arbeitsaufgabe.

Abbildung 2

Demonstrator des mobilen, kollaborativen Roboters



Anmerkung. Als Demonstrator wurde ein mobiler Roboter von Grenzebach mit einem Yaskawa 6-Achs-Roboter als Aufsatz verwendet. Das linke Foto zeigt, wie der Demonstrator Servomotoren in einem Regal erfasst und entnimmt. Das rechte zeigt, wie der Roboter sechs der entnommenen Servomotoren in den Behälter einsetzt.

Als Anwendungskontext wird in dem Forschungsverbund, ebenso wie in der vorliegenden Arbeit eine Montageanwendung zur Fertigung von Hochleistungs-Etikettiermaschinen für die Getränkeindustrie herangezogen. Diese Montage enthält zum einen mehrere monotone Arbeitsschritte, die sich wiederholen und die Werksperson körperlich belasten, zum anderen sind die einzelnen Baugruppen sehr variantenreich, so dass die Arbeitsschritte schwer zu automatisieren sind. Der Anwendungsfall bezieht sich bei der Etikettiermaschine auf den Zusammenbau des Behältertisches, die eine wichtige Hauptbaugruppe der Maschine darstellt.

Ein weiterer Aspekt der MRK ist die spontane Programmierung des Roboters, um weitere Arbeitsschritte hinzuzufügen, die belastend und wiederholend für die Werkkräfte sind. Normalerweise wird die Programmierung von Robotern von Fachkräften vorgenommen, die den Quellcode schreiben. Deswegen ist sie in Unternehmen die organisatorische Schwachstelle (Grävemeyer, 2020). Dieser Ansatz ist zeit- und kostenaufwändig, weshalb Roboter in kleinen und mittleren Unternehmen keine große Rolle spielen. Um die Kosten und den Zeitaufwand für die Programmierung eines Robotersystems zu reduzieren, wird ein schnelles und intuitives Programmiersystem benötigt, das auch von Nicht-Fachkräften mit wenig oder gar keiner Programmiererfahrung verwendet werden kann. Es ergibt sich ein neuer Bedarf an

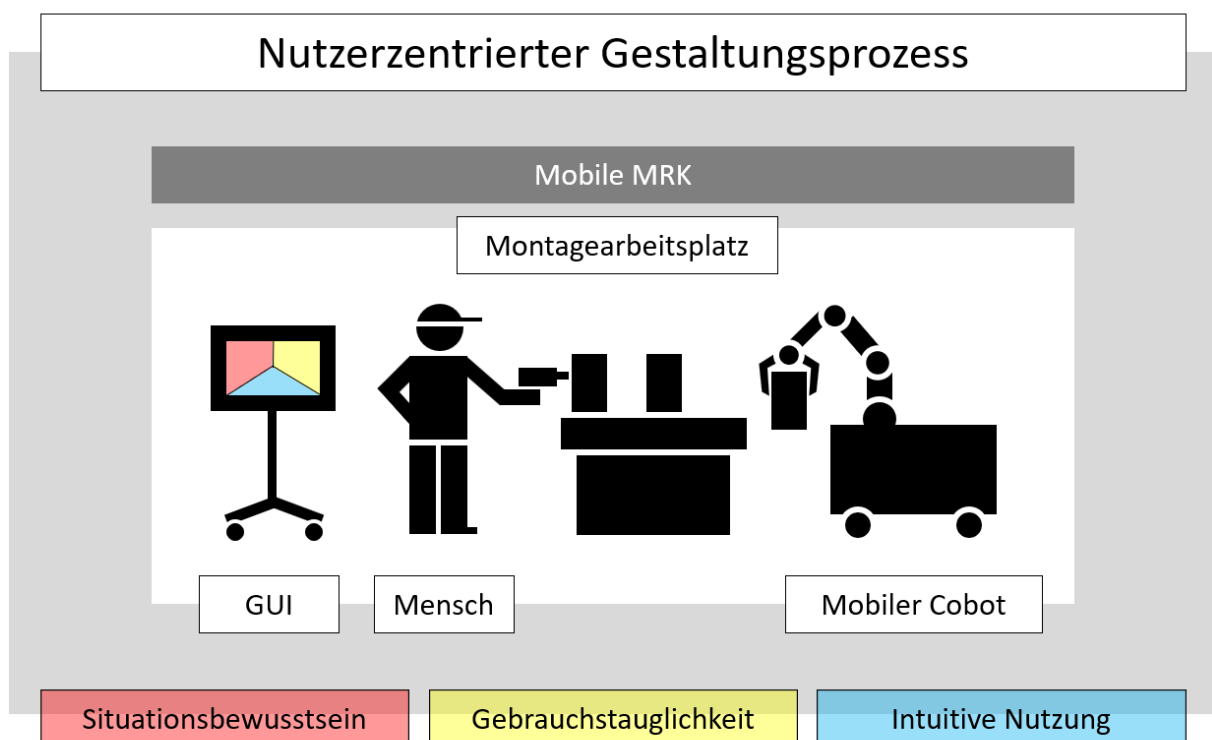
Programmiermechanismen, die weniger oder gar keine Kenntnisse benötigen (Gradmann, et al., 2019).

Im Kontext dieser Arbeit wurden drei Konstrukte identifiziert, die im Rahmen der Entwicklung von Benutzungsschnittstellen für die mobile MRK besonders relevant sind: Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung.

Abbildung 3 stellt die Thematik der Forschung dar, die übergeordnet den nutzerzentrierten Gestaltungsprozess mit den drei Konstrukten beinhaltet und den Zusammenhang zwischen den Konstrukten im Entwicklungsprozess umfasst. Sie stellen den Forschungsgegenstand dieser Arbeit dar. Bei der mobilen MRK am Montagearbeitsplatz, an dem Mensch und mobiler, kooperativer Roboter (= Cobot) gemeinsam eine Arbeitsaufgabe ausführen, geht es um die Benutzungsschnittstelle, die die Kommunikation zwischen beiden ermöglicht. Sie wird hier als grafische Benutzungsschnittstelle (Graphical User Interface = GUI) untersucht und gestaltet.

Abbildung 3

Übersicht über die Thematik der vorliegenden Forschung



1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Diese Arbeit greift die Problematik auf, die bei der Gestaltung von GUIs für die mobile MRK besteht. Der Weg von der theoretischen Vorgabe von Gestaltungsprinzipien hin zur praktischen Umsetzung durch deren Anwendung erfordert weitere Anleitung, um in diesem neuen Kontext geeignete Methoden für einen nutzerzentrierten Prozess zu erhalten.

Die übergeordnete Forschungsfrage, die in dieser Arbeit beleuchtet werden soll, lautet: **Mit welchen Methoden kann eine nutzerzentrierte GUI für die mobile MRK an Montagearbeitsplätzen gestaltet werden, die Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Roboterprogrammierung gewährleistet?**

Diese komplexe Fragestellung erfordert es, die Thematik in drei untergeordneten Forschungsfragen aufzuteilen. Bevor die GUI verwendet wird, muss die Werksperson die Umgebung und die Informationen, die für die Arbeitsaufgabe relevant sind, erfasst werden. Dabei ist in diesem dynamischen System das Konstrukt Situationsbewusstsein essenziell. Es ergibt sich die erste untergeordnete Forschungsfrage, bezogen auf die Entwicklung einer GUI:

FF1: Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI gestaltet werden, die das Situationsbewusstsein in der MRK bestmöglich unterstützt?

Nach erfassen relevanter Informationen, die in der GUI dargestellt werden sollten, wird die GUI mit Fokus auf Gebrauchstauglichkeit weiterentwickelt. Dabei ist es besonders wichtig, die taktile Interaktion mit der Benutzungsschnittstelle zu erarbeiten, durch ein interaktives Mockup und mit einer Auswahl geeigneter Methoden, die zu einer guten Gebrauchstauglichkeit führen. Insofern stellt sich folgende weitere Forschungsfrage:

FF2: Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI für eine gebrauchstaugliche MRK gestaltet werden?

Anschließend sollte die GUI für die MRK auch die Möglichkeit besitzen, von Werkskräfte spontan und intuitiv programmiert werden zu können. Technisch ist daher die Basis einer Playback Programmierung für die handgeführte Programmierung eines kollaborativen Roboterarms bereits gegeben (Riedl & Henrich, 2019). Das Ziel ist es, mit einem geeigneten Gestaltungsprozess die Roboterprogrammierung durch das GUI besonders intuitiv zu gestalten.

FF3: Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI für intuitive Roboterprogrammierung im Kontext der MRK gestaltet werden?

1.3 Übersicht über die Struktur der Arbeit

Die Dissertation beschäftigt sich mit der nutzerzentrierten Gestaltung von GUIs für die mobile MRK bei Montagearbeitsplätzen. Die Forschung zielt darauf ab, eine benutzungsfreundliche, effiziente und intuitiv programmierbare Gestaltung der Benutzungsschnittstellen zu erleichtern, um die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter zu verbessern.

Im **theoretischen Rahmen** (Kap.2) werden verschiedene Theorien und Konzepte zur Mensch-Roboter-Kooperation behandelt. Hierzu gehören die MRK-Klassifizierung, Grundlagen zu Arbeitssystemen, Montageformen sowie Interaktions- und Sinnesmodalitäten. Des Weiteren werden nutzerzentrierte Gestaltungsansätze wie Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit, intuitive Nutzung und weitere Gestaltungsansätze vorgestellt. Es erfolgt außerdem eine Strukturierung verwandter Arbeiten und eine Erläuterung des Anwendungskontextes der Arbeit, inklusive theoretischer Konstrukte, dem Gestaltungsprozess und dem vorliegenden Anwendungsfall.

Die **Studie 1** (Kap.3) beschäftigt sich mit dem Situationsbewusstsein für die mobile MRK. Hier wird der Hintergrund der Studie erläutert, verwandte Arbeiten werden vorgestellt und die Motivation und Forschungsfrage werden präsentiert. Das angewandte Vorgehensmodell wird detailliert beschrieben. Dazu gehört zum einen die Methode *Goal-Directed Task Analysis* (GDTA), die einteilt ist in eine teilnehmende Beobachtung, qualitativen Interviews mit Montagearbeitenden zur Arbeitsaufgabe (n=6), der Erstellung einer Zielhierarchie und dessen Validierung mit Werkspersonen (n=13). Es werden ein *Physical Model* und ein *Wireframe Design* erstellt, eine qualitative Befragung für Situationsbewusstsein mit Werkkräften (n=12) und eine quantitative Studie zur Messung von Situationsbewusstsein mit potenziellen Endnutzenden (n=30) durchgeführt. Das Vorgehensmodell zur Entwicklung des Wireframes wird erneut mit Studierenden (n=10) durchgeführt und validiert. Die Ergebnisse der Studie werden präsentiert und abschließend diskutiert.

Die **Studie 2** (Kap.4) befasst sich mit der Gebrauchstauglichkeit einer Benutzungsschnittstelle für die mobile MRK. Es werden der Hintergrund der Studie erläutert, verwandte Arbeiten vorgestellt und die Motivation und Forschungsfrage präsentiert. Die angewandte Methodik wird detailliert beschrieben, einschließlich der experimentellen Aufgabe, dem GUI-Design und verschiedenen Evaluierungsmethoden. Die Ergebnisse der Studie umfassen eine quantitative Studie über Eingabemodalitäten mit Werkkräften (n=31), qualitative Interviews zu Touch-Interfaces (n=11), ein interaktives Mockup, die heuristische Evaluierung mit Usability-

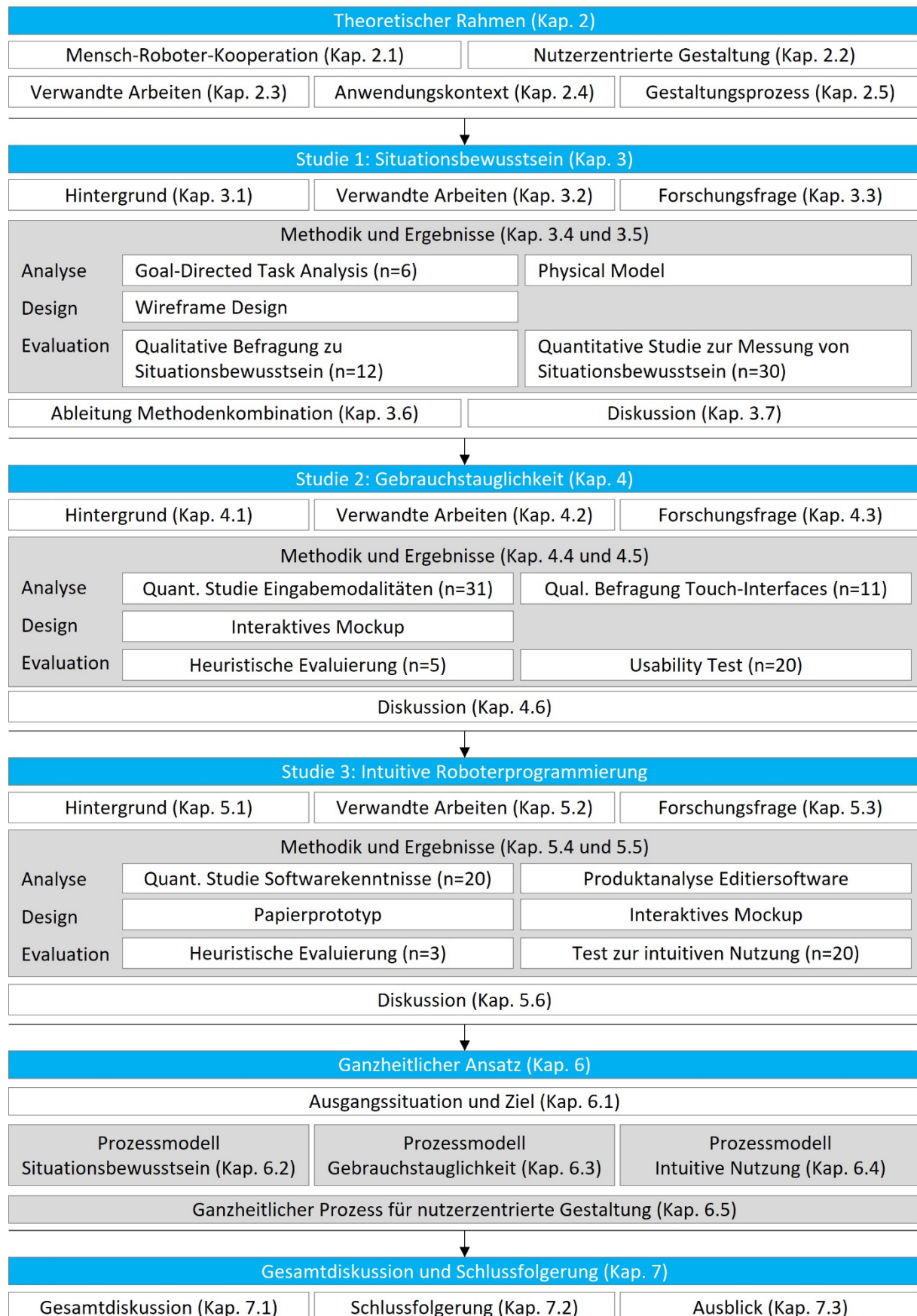
Fachkräften (n=5), einen Usability Test mit Endnutzenden (n=20) sowie die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse.

Die **Studie 3** (Kap.5) behandelt die intuitive Roboterprogrammierung. Hier werden der Hintergrund erläutert, verwandte Arbeiten vorgestellt und die Motivation und Forschungsfrage präsentiert. Die angewandte Methodik wird beschrieben, einschließlich der experimentellen Aufgabe und des Forschungsdesigns. Die Ergebnisse der Studie umfassen eine quantitative Befragung zu Programmierkenntnissen von Werkskräften (n=20), einer Produktanalyse, Papierprototypen, ein interaktives Mockup, die heuristische Evaluierung mit Usability-Fachkräften (n=3) sowie einem Test zur intuitiven Nutzung mit potenziellen Endnutzenden (n=20). Es wird außerdem eine Diskussion der Ergebnisse präsentiert.

Das Kapitel über den **ganzheitlichen Ansatz zur nutzerzentrierten Gestaltung** (Kap.6) einer GUI für die mobile MRK beinhaltet die Ausgangssituation sowie das Ziel, Prozessmodelle für Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit, intuitive Nutzung und den ganzheitlichen Ansatz.

Im Kapitel **Gesamtdiskussion und Schlussfolgerung** (Kap.7) wird der theoretische Rahmen für mobile MRK und nutzerzentrierte Gestaltung diskutiert. Es werden die Ergebnisse zu Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung für die mobile MRK interpretiert, die Forschungsfragen beantwortet und allgemeine Limitationen der Arbeit erläutert. Die wichtigste Schlussfolgerung ist, dass bei der GUI-Gestaltung für die mobile MRK nicht nur die Gebrauchstauglichkeit, sondern auch Situationsbewusstsein und intuitive Roboterprogrammierung in Betracht gezogen werden sollte, um einen ganzheitlichen Gestaltungsansatz zu entwickeln.

Abbildung 4 stellt die Struktur der Dissertation vom Theoretischen Rahmen bis zum Schlussteil dar.

Abbildung 4*Struktur der Dissertation*

2 Theoretischer Rahmen

Der theoretische Rahmen dieser Dissertationsschrift umfasst eine Reihe von relevanten Konstrukten und Ansätzen, um die Kooperation zwischen Werkskräften und mobilen, kollaborativen Industrierobotern an Montagearbeitsplätzen zu optimieren. Zunächst werden Theorien und Konzepte zur MRK sowie nutzerzentrierte Gestaltungsansätze untersucht. Anschließend werden verwandte Arbeiten strukturiert und der Anwendungskontext dieser Arbeit erläutert.

2.1 Theorien und Konzepte zur Mensch-Roboter-Kooperation

Die Theorien und Konzepte zur Mensch-Roboter-Kooperation umfassen die MRK-Klassifizierung, Arbeitssysteme, Montageformen sowie Interaktionsformen und Sinnesmodalitäten. Durch die Integration dieser theoretischen Konzepte trägt diese Dissertation dazu bei, ein umfassendes Verständnis für die nutzerzentrierte Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für die mobile MRK an Montagearbeitsplätzen zu entwickeln und neue Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendung von Methoden zu gewinnen, die die GUI gebrauchstauglich, intuitiv und für ein hohes Situationsbewusstsein optimiert gestalten.

2.1.1 MRK-Klassifizierung

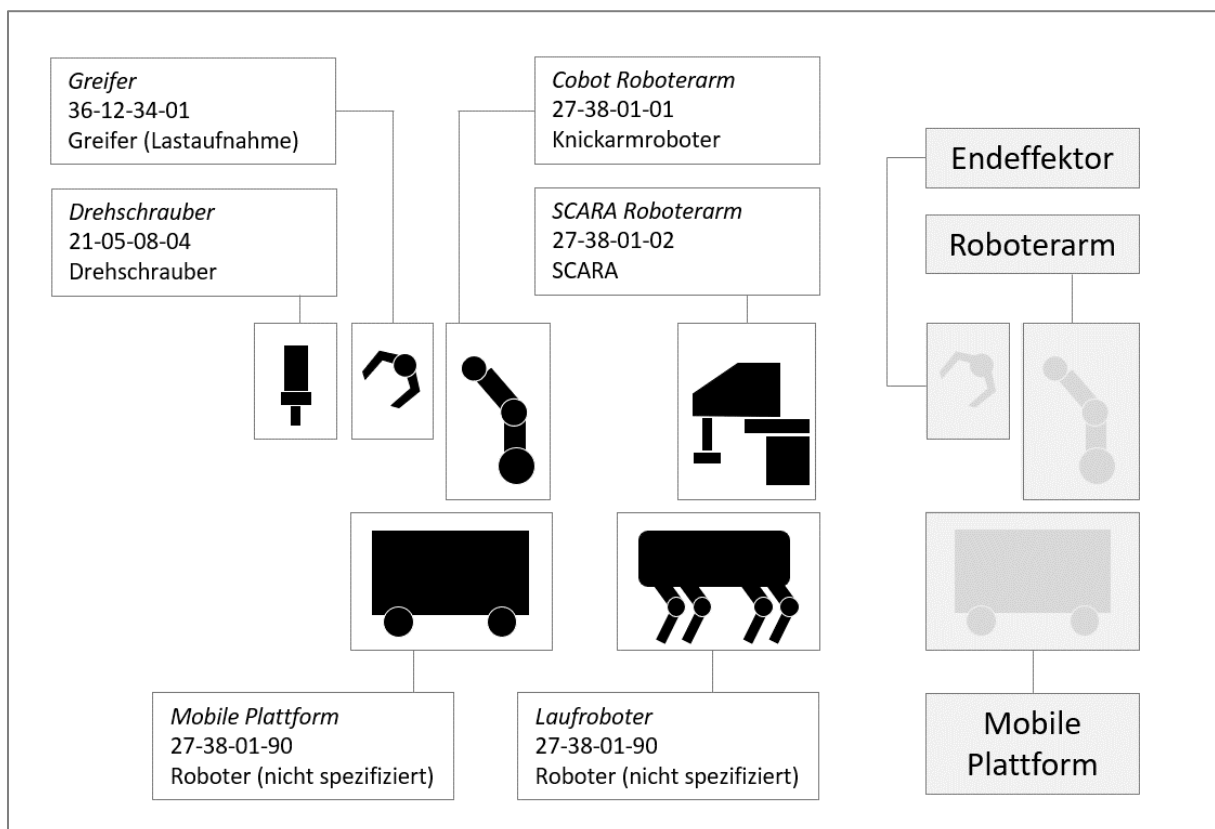
Um die MRK zu klassifizieren, gibt es einige Ansätze für Taxonomien. Eine Taxonomie bezogen auf die Mensch-Roboter-Interaktion wurde entwickelt, um unterschiedliche Roboter nach standardisierten Kriterien zu klassifizieren (Onnasch et al., 2016). Die Taxonomie ist in zehn Kategorien eingeteilt, die zu drei Klassifikationsclustern gebündelt werden. Die drei Cluster beziehen sich auf die Interaktionsklassifikation, die Roboterklassifikation und die Teamklassifikation. Die Interaktionsklassifikation enthält die Kategorien Interaktionsform (Kollaboration, Kooperation, Existenz) und Interaktionsrolle des Menschen (Supervisor, Operateur, Kollaborateur, Kooperationspartner, Nicht-Beteiligter). Die Roboterklassifikation enthält die Aufgabe des Roboters (Informationsaustausch, Entlastung, Manipulation etc.), das Einsatzgebiet des Roboters (Industrie, kommerzieller Service etc.), die Morphologie des Roboters (humanoid, zoomorph, funktional) und den Autonomiegrad des Roboters (Informationsaufnahme, -verarbeitung, Entscheidungsfindung etc.). Die Teamklassifikation besteht aus den vier Kategorien Kommunikationskanal (elektronisch, mechanisch, akustisch etc.), der räumlichen Nähe (berührend, führend, vermeidend, ferngesteuert etc.), der zeitlichen

Nähe (synchron, asynchron) und der Teamzusammensetzung (Verhältnis Mensch-Roboter $N_M=N_R$, $N_M>N_R$, $N_M<N_R$).

Um eine einheitliche Beschreibungsform für die Elemente des mobilen Roboters zu ermöglichen, werden in den Betriebswissenschaften die sogenannten Betriebsmittel (Werkzeuge etc.) nach Vorgaben der ECLASS benannt (ECLASS e.V., 2023). Abbildung 5 zeigt schematisch eine Einteilung der Roboter Elemente in Mobile Plattform, Roboterarm und Endeffektor. Daneben werden exemplarisch Varianten der Roboter Elemente dargestellt.

Abbildung 5

Einteilung der Roboter Elemente in Mobile Plattform, Roboterarm und Endeffektor



Anmerkung. Exemplarisch werden Varianten der Roboter Elemente dargestellt. Eine Variante mit SCARA-Roboterarm und Laufroboterplattform (Mitte), eine Variante mit fahrender Plattform, Knickarmroboter, einem Greifer und alternativ einem Drehschrauber (links).

Eine Taxonomie von Fähigkeiten in der Montage wurde entwickelt, um die Fähigkeiten von Arbeitsmitteln in der Automatisierungstechnik hardwareunabhängig zu beschreiben (Hammerstingl & Reinhart, 2017). Die Fähigkeiten werden dabei in elementare und zusammengesetzte Fähigkeiten unterteilt. Die elementaren Fähigkeiten umfassen das

Handhaben, Verbinden, Kontrollieren, den Informationsaustausch, die Mensch-Maschine-Interaktion sowie Sonderfunktionen. Das *Handhaben* beinhaltet das Bewegen und Sichern von Objekten, während das *Verbinden* verschiedene Arten von Verbindungen wie Formschluss, Kraftschluss und Stoffschluss umfasst. *Kontrollieren* beinhaltet das Messen und Prüfen von Objekten, während der *Informationsaustausch* das Speichern und Lesen von Informationen betrifft. Die *Mensch-Maschine-Interaktion* beinhaltet das Anzeigen und Stellen von Informationen, *Sonderfunktionen* umfassen das Dosieren, Sprühen und Markieren von Objekten. Zusammengesetzte Fähigkeiten werden in verschiedene Kategorien unterteilt, darunter *Handhaben* (wie das Pick-and-Place und das *Transportieren* von Objekten, *Fügen* nach DIN 8593 (Einschließlich des Zusammensetzens und Kleben gemäß der DIN 8293-1 bzw. 8593-8), *Kontrollieren* (Messen und Prüfen) sowie *Sonderfunktionen* (wie Schmieren, Erwärmen und Kühlen). Zusammengesetzte Fähigkeiten setzen sich aus mehreren elementaren Fähigkeiten zusammen, wobei auch zwei Geräte über eine mechanische Schnittstelle verbunden sein können, z.B. ein Roboter mit einem Greifer. Abbildung 6 stellt eine Auswahl an Fähigkeiten dar, die für die Montage des Behältertisches relevant sind.

Abbildung 6

Auswahl an Fähigkeiten, die für die Montage des Behältertisches relevant sind

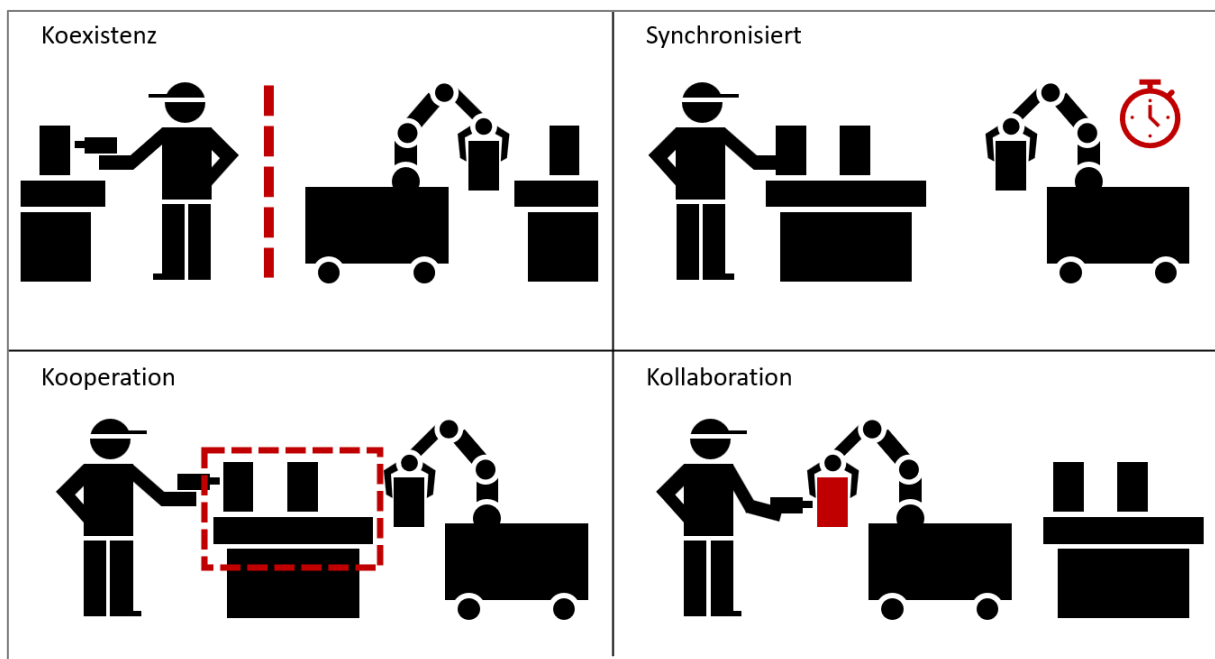


Anmerkung. In diesem Anwendungsfall hat der Roboter die Fähigkeiten für Pick & Place Aufgaben und zum Transportieren. Der Mensch muss die restlichen Fähigkeiten haben, um die Arbeitsaufgabe durchzuführen.

Bei der Mensch-Roboter-Interaktion werden fünf Grade der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter unterschieden (Bauer, Bender, Braun, Rally, & Scholtz, 2016). Interaktionstyp 1 wird als *Zelle* bezeichnet und stellt den klassischen Schutzzaunbetrieb dar. Typ 2 wird als *Koexistenz* bezeichnet, bei der Mensch und Roboter nebeneinander arbeiten, jedoch ohne gemeinsamen Arbeitsraum arbeiten. Der dritte Interaktionstyp heißt *Synchronisiert* und ist so ausgelegt, dass sich immer nur Mensch oder Roboter im Arbeitsraum befindet, nie beide gleichzeitig. Der vierte Interaktionstyp ist die *Kooperation*, bei dem sich Mensch und Roboter einen Arbeitsraum teilen, aber nicht gleichzeitig am selben Produkt oder Bauteil arbeiten. Der fünfte Interaktionstyp ist die *Kollaboration*, bei der beide Interaktionspartner gleichzeitig am selben Produkt oder Bauteil arbeiten. Bei kooperativen und kollaborativen Robotern entfällt Typ 1 in der Zelle und es verbleiben die anderen vier Typen, wie in Abbildung 7 dargestellt.

Abbildung 7

Vier Grade der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Cobot



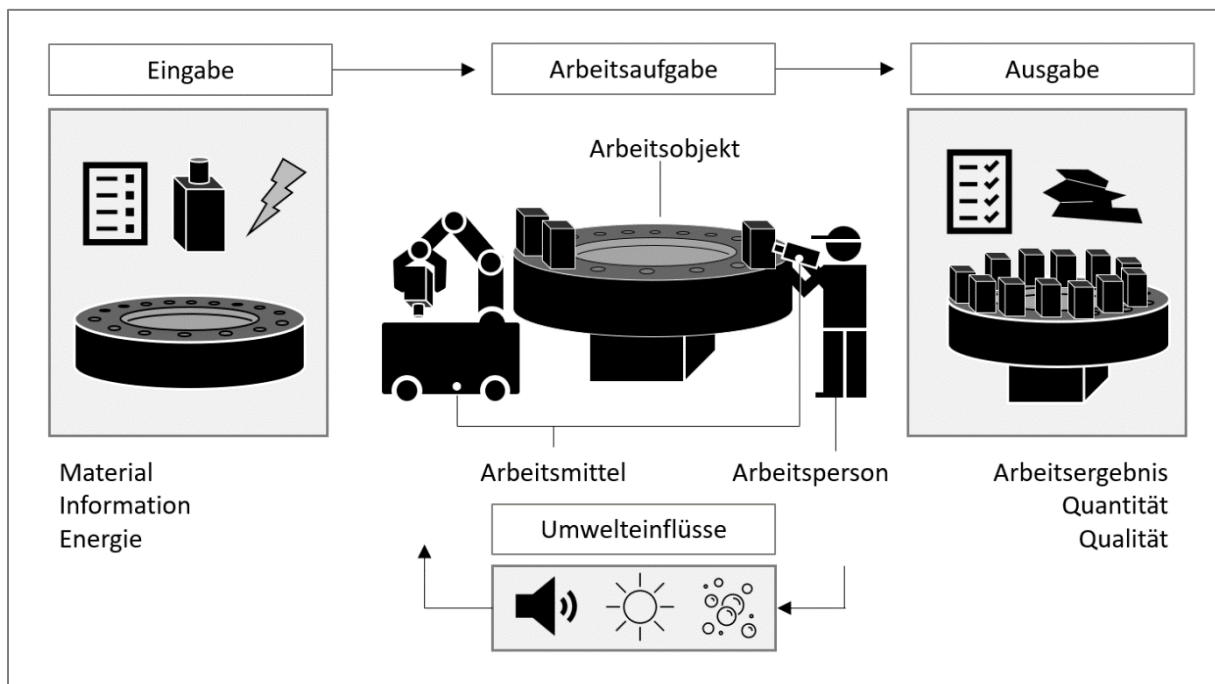
2.1.2 Arbeitssysteme

Das Arbeitssystem ist ein Begriff aus der Arbeitswissenschaft, das sowohl einen einzelnen Arbeitsplatz als auch einen ganzen Betrieb bezeichnen kann (Schlick, Bruder, & Luczak, Arbeitswissenschaft im Umriss: Disziplinen- und Konzeptstruktur, 2018). Es ist ein Ordnungsschema zur systematischen Beschreibung von Arbeitsplätzen, eingeteilt in die Elemente Arbeitsperson, Arbeitsauftrag, Arbeitsaufgabe, Eingabe, Ausgabe, Arbeitsmittel,

Arbeitsobjekte und Umwelteinflüsse. DIN EN ISO 6385 (Deutsches Institut für Normung eV., 2016) definiert das Arbeitssystem wie folgt: „System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems, innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen, zu erfüllen.“ Neben der Gestaltung des Arbeitssystems werden die Bewertung und Überwachung unter Einhaltung folgender Kriterien empfohlen: Gesundheit und Wohlbefinden, Sicherheit, Systemleistung, Gebrauchstauglichkeit und Kosten-Nutzen. Im Kontext dieser Forschung werden mit Eingabe die vorhandenen Dokumente bezeichnet (z.B. Baugruppenzeichnung, Prüfprotokoll), Betriebs- und Hilfsmittel (z.B. Servomotoren, Kleber, Schmiermittel) und Energie (z.B. Druckluft, Strom). Die Ausgabe ist die montierte Baugruppe, das ausgefüllte Prüfprotokoll und Abfallstoffe (z.B. Verpackungsmaterial, Ausschussteile). Die Arbeitsaufgabe bezieht sich auf die Montage des Behältertisches, wobei der Behältertisch selbst als Arbeitsobjekt bezeichnet wird. Die arbeitswissenschaftliche Bezeichnung der Arbeitsperson entspricht der Werkkraft. Roboter und Werkzeuge werden als Arbeitsmittel bezeichnet. Umwelteinflüssen sind z.B. Licht, Lärm, Chemikalien und Dämpfe, die die Arbeitsperson beeinträchtigen können. Abbildung 8 stellt ein Arbeitssystem der mobilen MRK für Montageanwendungen schematisch dar.

Abbildung 8

Arbeitssystem der mobilen MRK für Montageanwendungen



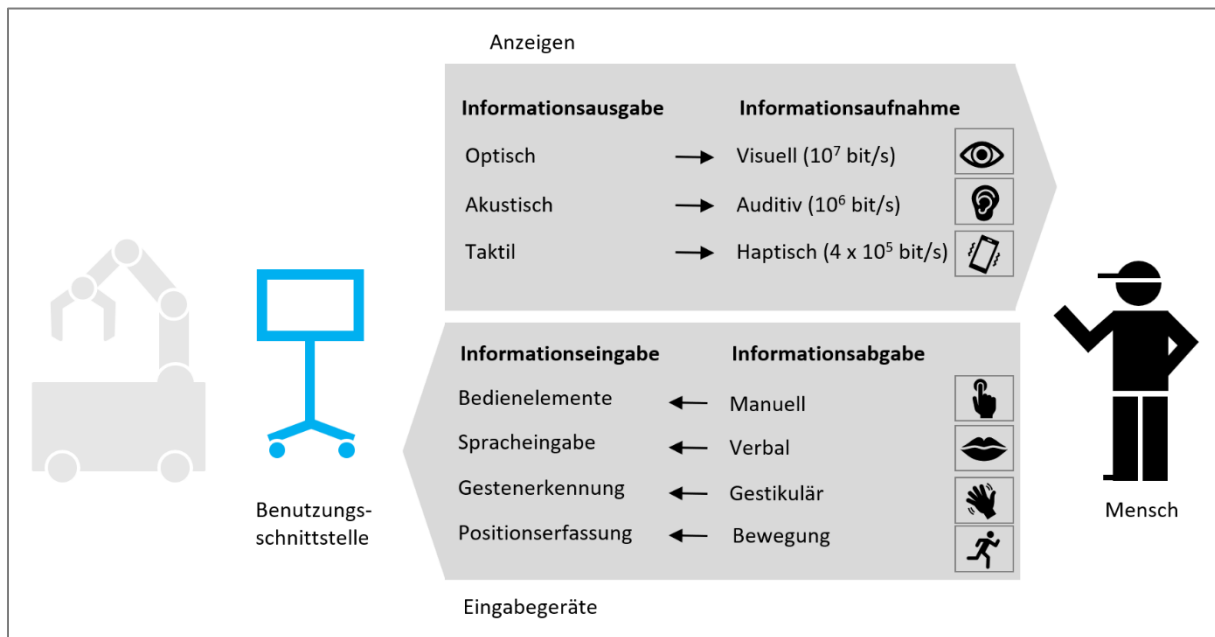
2.1.3 Montageformen

Die Formen der Montage werden in fünf Kategorien eingeteilt, die sich *Manuelle Montage von Kleingeräten*, *Manuelle Montage von Großgeräten*, *Hybride Montagesysteme*, *Automatische Montagesysteme* und *Flexible Montageautomaten mit Robotereinsatz* nennen (Lotter & Wiendahl, 2013).

Die manuelle Montage von Großgeräten (z.B. Maschinen, PKW-Motoren, Schaltschränke) lassen sich in zwei Ausprägungen einteilen: die Baustellenmontage, bei der das Montageobjekt stationär angeordnet bleibt, und die Fließmontage, bei der das Montageobjekt von einer Montagestation zur anderen wechselt. Diese Arbeit greift die Baustellenmontage auf, denn die Montageobjekte sind stationär und Montagepersonen sind den Baustellen fest zugeordnet. Ebenso sind Montagestelle und Materialbereitstellung räumlich voneinander getrennt. Für die Montage des Objekts ist die Hauptarbeitsstelle da, die Nebearbeitsstelle ist für vorbereitende Tätigkeiten erforderlich, z.B. Schrauben einfetten und Baugruppen vormontieren.

2.1.4 Interaktionsformen und Sinnesmodalitäten

Um Informationen vom Roboter zum Menschen zu übertragen, werden Anzeigen verwendet, die Auskunft über den Zustand der Subsysteme, des Arbeitsobjektes oder des Prozesses geben. Die Anzeigen können von der Benutzungsschnittstelle z.B. optisch, akustisch oder taktil ausgegeben werden. Die Übertragung von Informationen vom Menschen zum Roboter erfolgt über Eingabegeräte, die je nach Technologie z.B. manuell, verbal oder gestikulär eingegeben werden kann. Die Gestaltung der Benutzungsschnittstelle und ihr Zusammenspiel im jeweiligen Kontext haben beeinflussen eine effiziente, fehlerfreie Mensch-Maschine-Interaktion (Schlick, Bruder, & Luczak, Ergonomische Gestaltung, 2018, S. 431). Abbildung 9 stellt eine Übersicht über Möglichkeiten der Informationsverarbeitung bei der MRI dar.

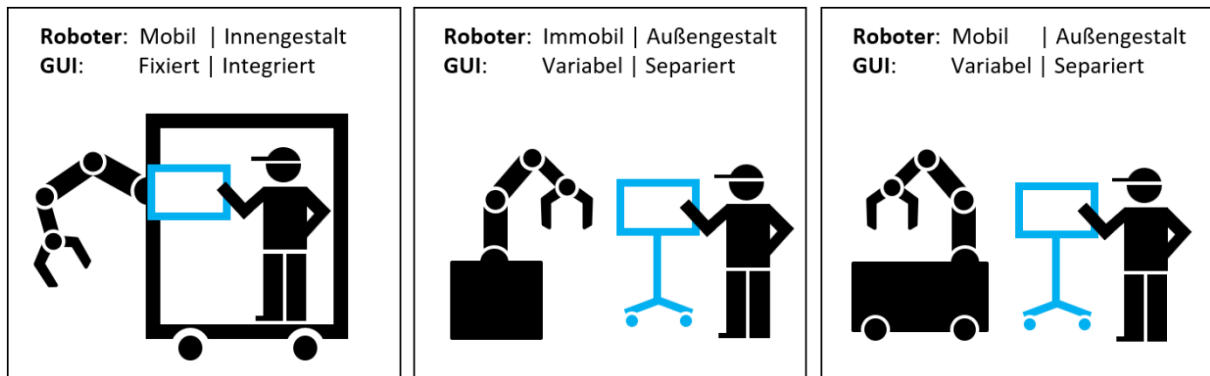
Abbildung 9*Übersicht über Möglichkeiten der Informationsverarbeitung bei der MRI*

Anmerkung. Bei der Informationsaufnahme ist die Geschwindigkeit der Informationsübertragung in Klammern angegeben.

Ein Rahmen für taktile und haptische Interaktion wird in DIN EN ISO 9241-910 (Deutsches Institut für Normung eV., 2011) beschrieben. Dabei wird der Bereich der Haptik in die zwei Gruppen Berührung (mechanische, thermische, chemische und elektrische Stimulation) und Kinästhetik (Körperkraft, Körperlage, Ausrichtung der Gliedmaße und Winkel des Gelenks) eingeteilt. Die Beziehung zwischen Mensch und Maschine kann in verschiedene Kategorien eingeteilt werden, die durch vier Parameter definiert sind (Schmid & Maier, 2017, S. 59). Die vier Parameter sind *Mobilität*, *Variabilitätsgrad*, *Gestalttyp* und *Koordinatensystem* des Systems. Bezüglich der Mobilität kann das Objekt mobil oder immobil sein. Bezüglich des Variabilitätsgrad wird die Benutzungsschnittstelle als variabel oder fixiert betrachtet. Der Gestalttyp kann entweder eine Innengestalt, in der der Mensch sich befindet, oder eine Außengestalt sein. Beim Faktor Koordinatensystem kann die Benutzungsschnittstelle entweder in die Produktgestalt integriert sein oder davon separiert sein. Diese Systematisierung ist relevant, weil sie die Interaktion zwischen einem Menschen und einem mobilen System thematisiert, in dem der Mensch nicht selbst fährt. Gleichzeitig befindet sich die Benutzungsschnittstelle nicht am mobilen System, sondern mobil im Raum. Abbildung 10 zeigt drei verschiedene Kategorien auf, um die Unterschiede der Kategorien zu sehen.

Abbildung 10

Parameter für Produktgestalten von Robotern und GUIs, drei exemplarische Varianten



Anmerkung. Die linke Variante entspricht einem mobilen Roboter, in dem die Person einsteigt und die GUI fixiert ist. Die mittlere Variante ist ein immobiler Roboter mit einer GUI wie im konkreten Anwendungsfall und entspricht einem Gegensatz zur linken Variante. Die rechte Variante ist der konkrete Anwendungsfall.

Der bidirektionale Informationsablauf zwischen Mensch und Maschine / Roboter wird in einem Basisschema abgebildet. Die Prozesse im Basisschema greifen auf Arbeits- und Langzeitgedächtnis zu. (Schmid & Maier, 2017, S. 57)

Eine prominente Form der Interaktion bei GUIs ist die gestische Multitouch-Eingabe. Es sind Gesten wie die einfache Berührung (*Tap*), die doppelte Berührung (*Double Tap*) oder Streichbewegungen (*Swipe*) eines oder mehrerer Finger, die Funktionen auf dem Bildschirm aktivieren. Dieser Bestand an Gesten ist bei verschiedenen Betriebssystemen nahezu identisch (Preim & Dachsel, 2015, S. 573).

Auch im Bereich grafischer Interaktionselemente haben sich im Laufe der Zeit Standards herauskristallisiert, die betriebssystemübergreifend identisch sind (Heinecke, 2011, S. 169). Sie können in Standard-Interaktionselemente und applikationsabhängige Interaktionselemente aufgeteilt werden. Die Standardelemente sind eingeteilt in Basiselemente (Eingabefeld, Schaltfläche, Auswahlliste, Grafik) und Erweiterungselemente (Rollbalken, Trennbalken). Applikationsabhängige Elemente sind z.B. Interaktionselemente für Hypermedia (Ankerworte, Auswahlgrafik). Die Interaktionselemente werden in ISO 9241-143 (Deutsches Institut für Normung eV., 2012) genauer beschrieben. Abbildung 11 listet eine exemplarische Sammlung von Interaktionselementen strukturiert auf.

Abbildung 11*Auflistung von Interaktionselementen für GUIs*

Eingabefeld für Daten Betrag ____, ____ €	Eingabefeld für Texte Text 1 Hier steht ein Text.								
Druckschalter Kopieren Löschen	Kontrollkästchen ☒ Task 1 ☒ Task 2 ☐ Task 3								
Optionsfeld ☐ Option 1 ☒ Option 2 ☐ Option 3	Listenfeld <table border="1"> <tr><td>Element 1</td><td>▲</td></tr> <tr><td>Element 2</td><td></td></tr> <tr><td>Element 3</td><td></td></tr> <tr><td>Element 4</td><td>▼</td></tr> </table>	Element 1	▲	Element 2		Element 3		Element 4	▼
Element 1	▲								
Element 2									
Element 3									
Element 4	▼								
Piktogramm 	Skala 								

2.2 Nutzerzentrierte Gestaltungsansätze

Es werden nutzerzentrierte Gestaltungsansätze beschrieben, die für die Anwendung bei der mobilen MRK relevant sind. Es gibt mehrere Gestaltungsansätze, zu denen die Konstrukte Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung gehören.

2.2.1 Situationsbewusstsein

Das Konstrukt *Situationsbewusstsein* ist essenziell für die nutzerzentrierte Gestaltung des GUI für die mobile MRK. Dadurch, dass sich das System relativ zum Nutzer bewegt, entsteht ein dynamisches System, das entsprechende Gestaltungsmethoden erfordert. In dieser Arbeit werden verschiedene Methoden zur Förderung des Situationsbewusstseins angewandt.

Eine häufig verwendete Definition von Situationsbewusstsein lautet: “Situation awareness is the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future.” (Situationsbewusstsein ist die Wahrnehmung der Elemente in der Umgebung innerhalb eines

Zeit- und Raumvolumens, das Verstehen ihrer Bedeutung und die Projektion ihres Status in der nahen Zukunft) (Endsley M. , 1995). Das Situationsbewusstsein kann in drei Ebenen unterteilt werden. Ebene 1 ist die Wahrnehmung von Elementen in der aktuellen Situation, Ebene 2 ist das Verständnis der aktuellen Situation und Ebene 3 ist die Projektion des zukünftigen Status. Wenn man den Status und die Dynamik der Elemente kennt und die Situation versteht, kann man zukünftige Zustände der Umwelt vorhersagen (Endsley M. , 1988).

Die Gestaltungsprinzipien für Situationsbewusstsein sind eingeteilt in Hauptprinzipien und die vier weiteren Themen bezogen auf Unsicherheit, Komplexität, Alarmsysteme und Automatisierung. Die Prinzipien 1-8 sind die Hauptprinzipien, 9-14 sind Gestaltungsprinzipien für die Darstellung von Unsicherheit (*design principles for representing uncertainty*), 15-24 sind Gestaltungsprinzipien zur Beherrschung von Komplexität (*design principles for taming complexity*), die Prinzipien 25-33 sind Grundsätze für die Gestaltung von Alarmsystemen (*principles for the design of alarm systems*) und 34-44 sind Grundsätze für die Gestaltung automatisierter Systeme (*principles for designing automated systems*).

Zur Vereinfachung werden die acht Hauptprinzipien in dieser Arbeit betrachtet, um eine Benutzungsschnittstelle zur Förderung des Situationsbewusstsein zu gestalten, die im Folgenden beschrieben werden:

Prinzip 1: Informationen sollten in Bezug auf die Hauptziele der Nutzenden organisiert werden.

Prinzip 2: Informationen der Ebene 2 sollten präsentiert werden, um das Verständnis direkt zu unterstützen.

Prinzip 3: Unterstützung sollte für Situationsbewusstseins-Projektionen der Ebene 3 erfolgen.

Prinzip 4: Unterstützung des globalen Situationsbewusstseins sollten gegeben sein, indem wichtige Elemente im Vordergrund bleiben.

Prinzip 5: Unterstützung von Kompromissen zwischen zielgerichteter und datengesteuerter Verarbeitung sollte erfolgen.

Prinzip 6: Wichtige Hinweise für die Schemaaktivierung sollten gegeben werden, z.B. durch Hervorhebung auffälliger kritischer Zustände.

Prinzip 7: Parallelverarbeitungsfunktionen sollten genutzt werden, z.B. in einer Kombination aus visuellen und auditiven Informationen.

Prinzip 8: Informationsfilterung sollte sorgfältig verwendet werden, um den Nutzenden relevante Informationen nicht vorzuenthalten.

Bezogen auf die Evaluierung des Situationsbewusstseins werden Methoden wie z.B. die *Situation Awareness Global Assessment Technique* (SAGAT) und die *Situation Awareness Rating Technique* (SART) empfohlen (Endsley, Selcon, Hardiman, & Croft, 1998).

Die Methoden, die in dieser Arbeit in Bezug auf das GUI-Design zur Förderung des Situationsbewusstseins verwendet wurden, sind die Goal-Directed Task Analysis, die Gestaltungsprinzipien 1-8 und die Methode SAGAT zur Messung des Situationsbewusstseins. Abbildung 12 zeigt die Kategorien Analyse, Gestaltung und Evaluierung im Konstrukt Situationsbewusstsein und exemplarisch Methoden und Gestaltungsprinzipien.

Abbildung 12

Methoden zur nutzerzentrierten Gestaltung für Situationsbewusstsein

Situationsbewusstsein	
Analyse	Goal-Directed Task Analysis
	...
Gestaltung	Gestaltungsprinzipien 1-8
	Gestaltungsprinzipien 9-14
	...
Evaluierung	SAGAT
	SART
	...
...	

2.2.2 Gebrauchstauglichkeit

Das Konstrukt Gebrauchstauglichkeit ist ebenso relevant wie das Situationsbewusstsein, jedoch erst erforderlich, wenn es um die aktive Bedienung der GUI geht.

Der nutzerzentrierte Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 (Deutsches Institut für Normung eV., 2020) empfiehlt bei der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen die Anwendung von Gestaltungsprinzipien, unter anderem aus DIN EN ISO 9241-110, 112 und 13. Besonders wirtschaftlich zur Evaluierung sind Inspektionsverfahren, weil sie in kurzer Zeit durchgeführt werden können (Held & Schrepp, 2019), wie z.B. die Heuristische Evaluation nach Nielsen (Nielsen & Molich, 1990). Eine Evaluierung von ausgearbeiteten Benutzungsschnittstellen sollte auch mit Endnutzenden durchgeführt werden. Diese Usability

Tests können mit standardisierten Fragebögen wie IsoMetrics oder ISONORM 9241/110 durchgeführt werden, wobei beide ähnlich aussagekräftig sind (Figl & Mensch, 2009). Eine Übersicht über Usability Methoden wurde in eine Taxonomie implementiert. Sie ist eingeteilt in die Klassen Testing, Inspection, Inquiry, Analytical Modeling und Simulation (Ivory & Hearst, 2001; Sawasdichai, 2004).

Die Gestaltungsprinzipien, die in DIN EN ISO 9241-110 (Deutsches Institut für Normung eV., 2020) beschrieben werden, lauten wie folgt: *Aufgabenangemessenheit*, *Selbstbeschreibungsfähigkeit*, *Erwartungskonformität*, *Lernförderlichkeit*, *Steuerbarkeit*, *Fehlertoleranz* und *Individualisierbarkeit*. *Aufgabenangemessenheit* ist gegeben, wenn die Interaktion auf die jeweilige Situation zugeschnitten ist, anstatt auf die eingesetzte Technologie, z.B. die richtigen Informationen im richtigen Umfang zum richtigen Zeitpunkt zu zeigen. *Selbstbeschreibungsfähigkeit* sagt aus, dass die Benutzenden zu jedem Zeitpunkt weiß, wo er sich in Dialog befindet und was er tun kann, z.B. wird er vom System durch den Dialog geleitet, benötigt keine zusätzlichen Handbücher und erhält stets relevante Informationen über Eingabeaufforderungen und Zustandsänderungen. *Erwartungskonformität* bedeutet, das System tut das, was die benutzende Person erwartet, z.B. verwendet das System vertrautes Vokabular, ist innerhalb der Arbeitsaufgabe konsistent und gibt den Benutzenden unmittelbare und passende Rückmeldungen. *Lernförderlichkeit* sagt aus, dass das System die Benutzenden lehrt und durch die Anwendung führt, z.B. durch Schritt-für-Schritt Anleitungen, durch Rückmeldung und Erläuterung von Funktionen, Erlauben von neu ausprobieren geeigneter Dialogschritte. *Steuerbarkeit* bedeutet, die benutzende Person bestimmt über Richtung und Geschwindigkeit von Funktionen, z.B. können letzte Schritte rückgängig gemacht werden oder unterbrochene Dialoge können wieder aufgenommen werden. *Fehlertoleranz* sagt aus, dass das System die Benutzenden vor Fehlern bewahrt und sie erklärt, z.B. kann das Ergebnis trotz Fehler mit minimaler Korrektur erreicht werden oder eine Positionsmarke erscheint dort, wo der Fehler gemacht wurde. *Individualisierbarkeit* bedeutet, das System erlaubt es, Darstellungen zu ändern, z.B. Darstellung von Grafiken für Benutzende mit eingeschränkten Lesefähigkeiten oder Anpassen von Vokabular und Farben.

Zur Gestaltung einer gebrauchstauglichen GUI werden Gestaltungsempfehlungen der DIN EN ISO 9241 – Teil 110, 112, 13 angewandt. Zur Evaluierung werden die heuristische Evaluierung und der Usability Test angewandt. Abbildung 13 zeigt eine Auswahl an Gestaltungsempfehlungen und Evaluierungsmethoden auf, bezogen auf Gebrauchstauglichkeit.

Abbildung 13*Gestaltungsempfehlungen und Evaluierungsmethoden für Gebrauchstauglichkeit*

Usability Gestaltungsempfehlungen		Usability Evaluierungsmethoden	
DIN EN ISO 9241-110	Aufgabenangemessenheit	Testen	Thinking Aloud Protocol
	Selbstbeschreibungsfähigk.		Performance Messung
	...		...
DIN EN ISO 9241-112	Entdeckbarkeit	Inspektion	Cognitive Walkthrough
	Ablenkungsfreiheit		Heuristische Evaluierung
	...		...
DIN EN ISO 9241-13	Eingabeaufforderungen	Befragung	Fokusgruppen
	Rückmeldung		Interviews
	...		...
...		...	

2.2.3 Intuitive Nutzung

Die intuitive Nutzung ist das dritte der relevanten Konstrukte dieser Arbeit. Dies ist der Fall, weil die intuitive Roboterprogrammierung als Teil der MRK betrachtet wird.

Eine Definition von intuitivem User Interface-Design beinhaltet, dass die Zielgruppe das Verhalten und die Funktionen der Benutzungsschnittstelle versteht, ohne viel nachzudenken, sich die Handhabung merken zu müssen, experimentieren zu müssen oder Unterstützung bzw. ein Training zu brauchen (McKay, 2013).

Das Thema Intuitivität im Kontext der Mensch-Technik-Interaktion wurde 2006 von einer Arbeitsgruppe untersucht (Mohs C. , et al., 2006). 24 Expertinnen und Experten für Mensch-Maschine-Systeme wurden gefragt, inwiefern intuitive Arbeit mit den sieben Grundsätzen der Dialoggestaltung zusammenhängt, wie sie in der Norm DIN EN ISO 9241-110 beschrieben sind. Die Ähnlichkeit der Prinzipien im Zusammenhang mit der Intuitivität wurde untersucht (Mohs C. , et al., 2006).

Es wurde die Ähnlichkeit des Prinzips in Verbindung mit Intuitivität abgefragt (Mohs C. , Hurtienne, Scholz, & Rotting, 2006). Die Bewertungsskala erstreckt sich von 1 (sehr ähnlich) bis 5 (gar nicht ähnlich). In Bezug auf die Merkmale ergab sich, dass die Erwartungskonformität der Intuitivität am ähnlichsten ist und erzielte einen Mittelwert von 1.4 (SD=0.8). Als nächstes ist es die Selbstbeschreibungsfähigkeit, die Ähnlichkeit zur Intuitivität aufweist und erhielt

einen Wert von $M=2.0$ ($SD=1.3$). Die Aufgabenangemessenheit wurde mit $M=2.5$ ($SD=1.2$) bewertet. In Bezug auf Steuerbarkeit wurde ein Wert von $M=3.3$ ($SD=1.2$) festgestellt. Hier zeigt sich bereits, dass Steuerbarkeit wenig zur intuitiven Nutzung beiträgt. Ähnlich ist es auch mit der Lernförderlichkeit, die einen Mittelwert von 3.6 ($SD=1.2$) erhalten hat. Die Fehlertoleranz wurde mit $M=3.8$ ($SD=1.1$) bewertet und am wenigsten Ähnlichkeit mit intuitiver Nutzung wurde das Prinzip der Individualisierbarkeit bewertet, das einen Wert von $M=4.0$ ($SD=1.0$) erzielt hat.

Außerhalb der ISO-Normen spielen auch Gestaltungsgesetze eine Rolle bei der Konzipierung von intuitiv bedienbaren Benutzungsschnittstellen (Mohs C. , et al., 2006). Gestaltgesetze sind Erfahrungsregeln, die Bedeutungszusammenhänge zwischen Objekten herstellen, durch Anordnung, Formgebung und farbliche Charakteristika (Heinecke, 2011, S. 63f). Folgende Gestaltgesetze sind in der Literatur zu finden (Thesmann, 2016): das Gesetz der Ähnlichkeit besagt, dass zusammengehörende Elemente durch Ähnlichkeiten erkannt werden. Das Gesetz der Nähe besagt, dass räumlich nahe beieinander liegende Elemente als zusammengehörig erkannt werden. Das Gesetz der Prägnanz besagt, dass die Darstellung von Elementen, die sich deutlich vom Rest unterscheiden und abheben, die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich zu ziehen. Das Gesetz der Erfahrung besagt, dass Elemente, die aus der Erfahrung bekannt sind, in der Wahrnehmung automatisch vervollständigt werden.

Es werden drei Stufen von Intuitivität benannt, die eingeteilt sind in *intuitiv*, *bedienbar* und *unbedienbar* (*intuitive*, *usable*, *unsusable*). Als *intuitiv* werden hier Systeme bezeichnet, die automatisch ablaufen oder alle Attribute der Intuitivität beinhalten. Als *bedienbar* werden Programme bezeichnet, die fehlende intuitive Attribute beinhalten, aber trotzdem gut bedienbar sind. Als *unbedienbar* werden Systeme bezeichnet, bei denen intuitive Attribute fehlen und die schlecht bedienbar sind (McKay & Musgrave, 2018).

Als intuitiv werden ebenso Natural Mappings und Stimulus-Response Kompatibilität gesehen. Das bedeutet, die Anordnung der Stimuli korrespondiert mit dem Ort, an dem die Antwortreaktion erwartet wird. Ein Beispiel ist die Anordnung von Drehknöpfen bei einem Herd (Sherwin, 2022). Es werden verschiedene Quellen für vorheriges Wissen angenommen, da die intuitive Nutzung als unterbewusste Anwendung von vorher gelerntem Wissen verstanden wird. Die Quellen für vorheriges Wissen werden in vier Stufen eingeteilt, wobei Stufe 1 auf angeborenes Wissen bezieht, Stufe 2 auf sensomotorisches Wissen durch die getätigte Interaktion, Stufe 3 setzt kulturelles Wissen voraus und Stufe 4 die Expertise von Tätigkeiten. Von Stufe 1 bis 4 wird es immer unwahrscheinlicher, dass dieses Wissen

unterbewusst angewendet wird, weil weniger Menschen dieses spezielle Wissen besitzen (Hurtienne & Blessing, 2007).

Intuitive Nutzung wird durch die Anwendung folgender Prinzipien erzielt: (McKay & Musgrave, 2018) Auffindbarkeit, Aufforderungscharakter, Verständlichkeit, Responsive Feedback, Vorhersehbarkeit, Effizienz, Nachsichtigkeit und Erforschbarkeit. Auffindbarkeit (*Discoverability*) bedeutet, benötigte Elemente können, wann und wo sie gebraucht werden, gefunden werden. Aufforderungscharakter (*Affordance*) sagt aus, dass z.B. visuelle Elemente den Nutzenden zeigen, wie die Interaktion durchgeführt wird. Verständlichkeit (*Comprehensibility*) bedeutet, Nutzende können schnell und sicher eine fundierte Entscheidung treffen, ohne Hilfe und ohne zu Experimentieren. Responsive Feedback (*Responsive Feedback*) sagt aus, dass Benutzende den Erfolg oder Misserfolg ihrer Aktionen sofort erkennen sollten. Vorhersehbarkeit (*Predictability*) sagt aus, dass die Bedienoberfläche die erwarteten Ergebnisse ohne Überraschungen oder Verwirrung liefert. Effizienz (*Efficiency*) bedeutet, die Interaktion ist mit einem Minimum an Anstrengung zu bewältigen. Nachsichtigkeit (*Forgiveness*) sieht vor, dass trotz Fehlern durch Bedienende das richtige passiert oder der Fehler kann leicht behoben bzw. rückgängig gemacht werden. Erforschbarkeit (*Explorability*) sieht vor, dass Bedienende die Benutzungsschnittstelle entdecken können ohne Angst vor Fehlern zu haben oder sich zu „verirren“.

Bezogen auf die Evaluierung für intuitive Nutzung wurden verschiedene Methoden wie der *Questionnaire for Measuring the Subjective Consequences of Intuitive Use* (QUESI) oder die *Scale to measure Subjective Experienced Effort* (SSEE) entwickelt und auf die Anwendung bei der Mensch-Roboter-Interaktion übertragen (Orendt, Fichtner, & Henrich, 2017). Die Evaluierungsmethoden werden in Kap. 5.4.6 näher beschrieben.

In dieser Arbeit werden die Gestaltungsprinzipien für intuitive Nutzung angewandt und die Evaluierungsmethoden für einen Test zur intuitiven Roboterprogrammierung. Abbildung 14 zeigt exemplarisch Methoden zur Gestaltung und Evaluierung für intuitive Nutzung auf.

Abbildung 14

Beispiele für Methoden zur Gestaltung und Evaluierung für intuitive Nutzung

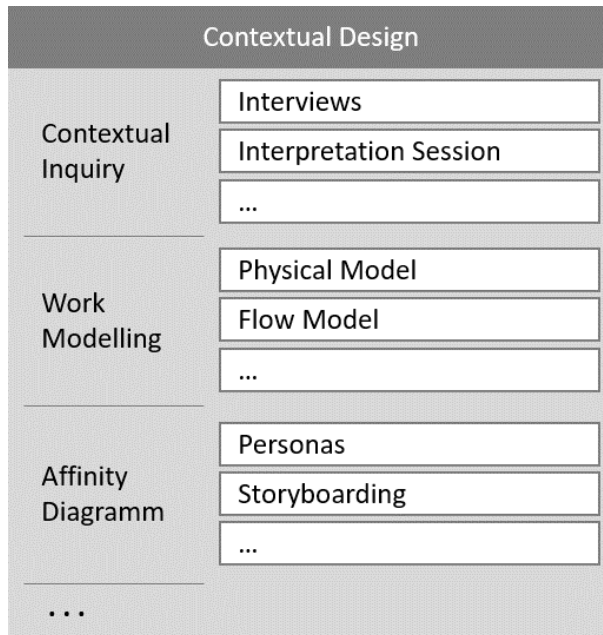
Intuitive Nutzung	
Gestaltungs- prinzipien	Auffindbarkeit
	Verständlichkeit
	...
Evaluierung	QUESI
	SSEE
	...
...	

2.2.4 Contextual Design

Der Ansatz *Contextual Design* enthält die Methode *Physical Model*, die in dieser Arbeit als unterstützende Methode für die Gestaltung eines situationsbewusstseinsfördernden GUI-Designs eingesetzt wird.

Contextual Design ist ein Prozess für die Gestaltung im Sinne der Mensch-Computer-Interaktion. Der nutzerzentrierte Gestaltungsprozess von Contextual Design hat kontextabhängige Befragungen, sogenannte Contextual Inquiries, im Fokus, die Anwendende an Computerarbeitsplätzen betreffen. Der Prozess beinhaltet die sechs Phasen *Contextual Inquiry*, *Work Modelling*, *Consolidation*, *Work Redesign*, *System Design* und *Prototyping*. Jede Phase ist noch einmal in weitere Methoden unterteilt. So besteht die Phase Work Modelling aus den fünf Methoden *Sequence Model*, *Physical Model*, *Artifact Model*, *Flow Model* und *Cultural Model*.

Das hier verwendete *Physical Model* ist eine visuelle Darstellung aus Raum und der Platzierung von Personen und Objekten (Holtzblatt & Beyer, 2017; Hotzblatt, Wendell, & Wood, 2004). Abbildung 15 zeigt exemplarisch Methoden aus dem Contextual Design Ansatz auf.

Abbildung 15*Methoden zur Gestaltung für Contextual Design***2.2.5 Research through Design**

Ein weiterer methodischer Ansatz, um mit Wissen zum nutzerzentrierten Designprozess beizutragen, kann mit *Research through Design* erreicht werden. Dabei handelt es sich um einen Ansatz zur Entwicklung explorativer neuer Erkenntnisse, der durch Phasen wissenschaftlicher Forschung und Untersuchung angetrieben wird (Jonas, 2007). Seit den ersten Ansätzen (Frayling, 1993) hat sich *Research through Design* nicht nur im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion etabliert (Zimmermann & Forlizzi, 2014; Gaver, 2012), sondern findet auch in der MRK-Anwendung (Samuelsson-Gamboa, Obaid, & Ljungblad, 2021; Luria, Zimmermann, & Forlizzi, 2019). Es besteht daher ein hohes Potenzial, durch explorative Forschung, die interdisziplinär angelegt sein sollte, neues Wissen zu generieren.

Hier wird Research through Design zur Kombination von Methoden verschiedener Ansätze und Konstrukte eingesetzt, damit ein stimmiges Prozessmodell entwickelt und reflektiert werden kann.

2.2.6 Weitere Gestaltungsansätze

Der Vergleich mehrerer Gestaltungsansätze führt zur Erkenntnis, welche Prozessphasen am häufigsten eingesetzt werden und dass nutzerzentrierte Prozesse mehrere Iterationen enthalten.

In der Dissertation „Analyse und Anwendung eines menschenzentrierten Gestaltungsprozesses zur Entwicklung von Human-Machine-Interfaces im Arbeitskontext am Beispiel Flugsicherung“ werden bereits mehrere Vorgehensmodelle miteinander verglichen (König, 2012, S. 36). Dazu gehören unter anderem die DIN EN ISO 9241-210, Design Thinking und der Usability Engineering Lifecycle. Die Prozesse werden den Phasen Planung, Zieldefinition, Gestaltung, Evaluation und Reale Nutzung zugeordnet.

Verschiedene Modelle können eingesetzt werden, um nutzerzentrierte Benutzungsschnittstellen zu entwickeln. Im Allgemeinen beinhalten sie Schritte wie das Festlegen von Anforderungen, das Erstellen von Designs und das Testen. Die Modelle unterscheiden sich in der Reihenfolge der Schritte und wie sehr die Endnutzenden eingebunden werden. Es gibt einen Trend zu iterativen Modellen, bei denen die Beteiligung der Nutzenden und die Zusammenarbeit in multidisziplinären Teams wichtig sind. Einige Modelle betonen die Evaluation weniger, jedoch wird angenommen, dass ein Abgleich von Anforderungen und Gestaltungslösungen stattfindet. Ein umfassendes Modell, das alle Aktivitäten abdeckt, ist die DIN EN ISO 9241-210 (König, 2012, S. 34).

Vier weitere Ansätze für den Entwurfsprozess wurden als Beispiele ausgewählt, um Gemeinsamkeiten zu identifizieren. Alle diese Ansätze beziehen sich auf einen nutzerzentrierten Entwurfsprozess. Die einzelnen Phasen unterscheiden sich stark in ihrer Formulierung und Detaillierung. Auf den ersten Blick ergibt sich kein einheitliches Bild. Der Designprozess, wie er in der deutschen Norm DIN EN ISO 9241-210 zu finden ist, umfasst die Phasen Planung des nutzerzentrierten Designprozesses, Verstehen und Spezifizieren des Nutzungskontextes, Spezifizieren der Nutzeranforderungen, Erstellen von Designlösungen, Bewertung des Designs anhand der Anforderungen und Designlösung erfüllt Nutzeranforderungen. Der Designprozess nach (Akker, Gravemeijer, McKenney, & Nieveen, 2006) besteht aus den Phasen Analyse, Entwurf, Bewertung und Überarbeitung. Der Designprozess nach (Gustafson, Branch, & Alpert, 2002) umfasst die Phasen Analysieren, Entwerfen, Entwickeln, Evaluieren und Implementieren. Der Design Thinking Prozess (Plattner, Meinel, & Weinberg, 2009) umfasst die Phasen Verstehen, Beobachten, Visionieren, Ideenfindung, Prototyping und Testen.

2.3 Literaturrecherche zum Stand der Forschung

Um verwandte Arbeiten zur vorliegenden Thematik zu identifizieren, wird die Suchmaschine *Google Scholar* (<https://scholar.google.de/>) verwendet. Dabei wird eine Variation von Suchbegriffen verwendet. Der konkrete Kontext dieser Arbeit ist die *Nutzerzentrierte Gestaltung einer GUI für die mobile Mensch-Roboter-Kooperation an Montagearbeitsplätzen: Integration von Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitiver Nutzung*. Daraus ergeben sich die Schlüsselbegriffe *nutzerzentrierte Gestaltung*, *GUI*, *mobil*, *Mensch-Roboter-Kooperation*, *Montagearbeitsplatz*, *Situationsbewusstsein*, *Gebrauchstauglichkeit* und *intuitive Nutzung*. Um die Suchergebnisse zu verbessern, wurden auch Synonyme und verwandte Begriffe verwendet. Für *nutzerzentrierte Gestaltung* wurde der verwandte Begriff *menschzentrierte Gestaltung* verwendet. *GUI* wurde auch ausgeschrieben als *grafische Benutzungsschnittstelle* und verallgemeinert als *Benutzungsschnittstelle* sowie *Benutzeroberfläche* gesucht. Für *Mensch-Roboter-Kooperation* wurde auch *Mensch-Roboter-Kollaboration* und allgemein *Mensch-Roboter-Interaktion* verwendet, ebenso die Abkürzungen *MRK* und *MRI*. Für *Montagearbeitsplatz* wurden alternativ die Begriffe *Montage*, *Produktion* und *Fertigung* eingesetzt. Es wurde ebenso nach den englischen Begriffen gesucht, da die meisten wissenschaftlichen Arbeiten auf Englisch verfasst werden. Daraus ergeben sich folgende englischen Suchbegriffe: *User-centered design* (AE), *user-centred design* (BE), *human-centered design* (AE), *human-centred design* (BE), *graphical user interface*, *user interface*, *mobile*, *human-robot cooperation*, *human-robot collaboration*, *human-robot interaction*, *HRC*, *HRI*, *assembly*, *workplace*, *production*, *situation awareness*, *situational awareness*, *usability*, *intuitive*, *intuitivity*.

Herausgefiltert wurden Arbeiten, die zwar einen nutzerzentrierten Gestaltungsansatz benennen, jedoch lediglich eine technische Umsetzung durchführen, ohne Methoden der nutzerzentrierten Gestaltung anzuwenden. Ebenso wurden nur diejenigen Arbeiten in Betracht gezogen, die eine GUI für Roboter entwickeln, nicht nur den Roboter selbst oder eine GUI für eine andere Anwendung. Es wurde kein Publikationszeitraum vorgegeben, jedoch finden sich kaum Publikationen zu den verwandten Themen vor dem Jahr 2000.

Die Literaturrecherche führt zum Ansatz einer Systematisierung der Ergebnisse. Es kristallisieren sich fünf Richtungen heraus, was die nutzerzentrierte Gestaltung für die Mensch-Roboter-Kooperation angeht. Die Faktoren, die bei der Literaturrecherche erfasst werden, sind eingeteilt in Konstrukte (*Situationsbewusstsein*, *Gebrauchstauglichkeit* und *intuitive Nutzung*),

Mobilität des Roboters, MRK, Montagearbeitsplatz und Roboterprogrammierung. Sie sind in Tabelle 1 dargestellt.

1. Situationsbewusstsein von GUIs für mobile Roboter
2. Gebrauchstauglichkeit von GUIs für mobile Roboter
3. Gebrauchstauglichkeit von GUIs für stationäre Robotersysteme
4. Gebrauchstauglichkeit von GUIs für Roboterprogrammierung
5. Intuitive Nutzung von GUIs für Roboterprogrammierung

Die erste Kategorie, die Gestaltung von GUIs für mobile Roboter mit dem Fokus auf Situationsbewusstsein, ist hauptsächlich in Zusammenhang mit mobiler Robotik zu finden (Scholtz, Antonishek, & Young, 2004; Nourbakhsh, et al., 2005; Drury, Keyes, & Yanco, 2007). Dabei werden häufig Methoden für Situationsbewusstsein wie z.B. die GDTA und Evaluierungsmethoden wie SAGAT, SPAM, SART usw. angewandt. Es wird dabei nicht kommuniziert, wie Gestaltungsprinzipien angewandt und in das GUI-Design implementiert werden. Die mobile Robotik in Verbindung mit dem Konstrukt Situationsbewusstsein ist meistens im Kontext von Such- und Rettungsmaßnahmen zu finden. Bis auf wenige Ausnahmen (Riley & Endsley, 2005) beinhaltet die Forschung keine Mensch-Roboter-Kooperation, bei dem Mensch und Roboter gemeinsam an einer Arbeitsaufgabe arbeiten, wie es an einem Montagearbeitsplatz der Fall ist.

Die zweite Kategorie enthält ebenso den Fokus auf Gebrauchstauglichkeit und bezieht sich auf GUIs für die mobile Robotik (Marble, Bruemmer, & Few, 2003; Bazzano, Lamberti, Sanna, Paravati, & Gaspardone, 2017; Di Nuovo, et al., 2019). Dabei handelt es sich häufig um teleoperierte Roboter, die z. B. in der Landwirtschaft eingesetzt werden (Adamides, et al., 2017). Es werden meist Gestaltungsempfehlungen der Norm ISO 9241-110 angewandt und auf die GUI übertragen (Poeschl, Doering, Boehme, & Martin, 2009). Anschließend werden Usability Tests zur Evaluierung durchgeführt (Doering, et al., 2015). In den recherchierten Arbeiten werden weder konkrete Gestaltungselemente beschrieben noch weitere Teile der Norm angewandt, die darin empfohlen werden, z.B. ISO 9241-112, 13 etc.

Die dritte Kategorie der verwandten Arbeiten ist der Kontext stationärer MRK mit Fokus auf Gebrauchstauglichkeit, häufig im Zusammenhang mit Montagearbeitsplätzen (Petruck, et al., 2020; Schleicher, 2018). Meist geht es dabei um die pragmatische Entwicklung einer GUI und die Evaluierung durch Usability-Tests. Ein paar Arbeiten beziehen sich auf die mobile MRK und enthalten zusätzlich das Konstrukt der intuitiven Nutzung (Froschauer, et al., 2021; Ender, 2021). Auch hier wird die Anwendung von Gestaltungsprinzipien nicht transparent erläutert.

Die vierte Kategorie fokussiert die Gebrauchstauglichkeit für Roboterprogrammierung (Radmard, Moon, & Croft, 2015; Brettmeister & Chojecki, 2018; Granlund, Lafrenière, & Carr, 2001). Hier werden, wie in der dritten Kategorie, Usability Tests durchgeführt, jedoch für die Roboterprogrammierung statt für die MRK. Wie in den anderen Kategorien erfolgt die Gestaltung pragmatisch, der Prozess wird nicht klar beschrieben.

Die fünfte Kategorie bezieht sich auf die intuitive Nutzung, die bei der MRK bzw. Mensch-Roboter-Interaktion meist im Zusammenhang mit Roboterprogrammierung angewandt wird (Fang, Ong, & Nee, 2014; Stumm, Braumann, & Brell-Cokcan, 2016; Birkenkamp, Leidner, & Lii, 2017). Meist ist kein Industriekontext gegeben, ein paar Arbeiten beziehen sich jedoch auf Montageanwendungen (Hahn, 2007; Nicora, Ambrosetti, Wiens, & Fassi, 2021). Jedoch wird der Gestaltungsprozess auch hier nicht beschrieben.

Tabelle 1

Literaturrecherche verwandter Arbeiten

Kategorie	Konstrukt	Mobiler Roboter	MRK	Montage-arbeits-platz	Roboter-Program-mierung	Quelle
1	S	X				(Scholtz, 2002)
	S	X				(Riley & Endsley, 2004)
	S	X				(Scholtz, Antonishek, & Young, 2004)
	S	X				(Scholtz, Young, Drury, & Yanco, 2004)
	S	X				(Nourbakhsh, et al., 2005)
	S	X				(Scholtz, Astonishek, & Young, 2005)
	S	X				(Drury, Keyes, & Yanco, 2007)
	S	X				(Drury, Scholtz, & Kieras, 2007)
	S	X				(Gatsoulis, 2008)
	S	X				(Gatsoulis, Virk, & Dehghani-Sanij, 2010)

	S	X	X			(Riley & Endsley, 2005)
2	G	X				(Adamides, et al., 2017)
	G	X				(Chivarov, Chikurtev, Pleva, & Ondas, 2018)
	G	X				(Poeschl, Doering, Boehme, & Martin, 2009)
	G	X				(Doering, et al., 2015)
	G	X				(Bazzano, Lamberti, Sanna, Paravati, & Gaspardone, 2017)
	G	X				(Marble, Bruemmer, & Few, 2003)
	G	X				(Di Nuovo, et al., 2019)
	G	X		X	X	(Chacón, Ponsa, & Angulo, 2021)
	G	X	X			(Schmidtler, Körber, & Bengler, 2016)
3	G		X	X		(Petrucci, et al., 2020)
	G		X	X		(Sriviboon & Jiamsanguanwong, 2022)
	G		X	X		(Schleicher, 2018)
	G		X	X		(Schmatz, Beuss, Sender, & Fluegge, 2020)
	G		X	X		(Gutman, Olatunji, & Edan, 2021)
	G+I	X	X	X		(Froschauer, et al., 2021)
	G+I	X	X	X		(Ender, 2021)
4	G				X	(Radmard, Moon, & Croft, 2015)
	G				X	(Brettmeister & Chojecki, 2018)
	G				X	(Granlund, Lafrenière, & Carr, 2001)

	G				X	(Buchina, Kamel, & Barakova, 2016)
5	I				X	(Fang, Ong, & Nee, 2014)
	I				X	(Stumm, Braumann, & Brell-Cokcan, 2016)
	I				X	(Birkenkamp, Leidner, & Lii, 2017)
	I			X	X	(Hahn, 2007)
	I			X	X	(Nicora, Ambrosetti, Wiens, & Fassi, 2021)
	I	X			X	(Pot, Monceaux, Gelin, & Maisonnier, 2009)

Anmerkung. S = Situationsbewusstsein, G = Gebrauchstauglichkeit, I = Intuitive Nutzung

2.4 Verknüpfung von Anwendungskontext und theoretischem Rahmen

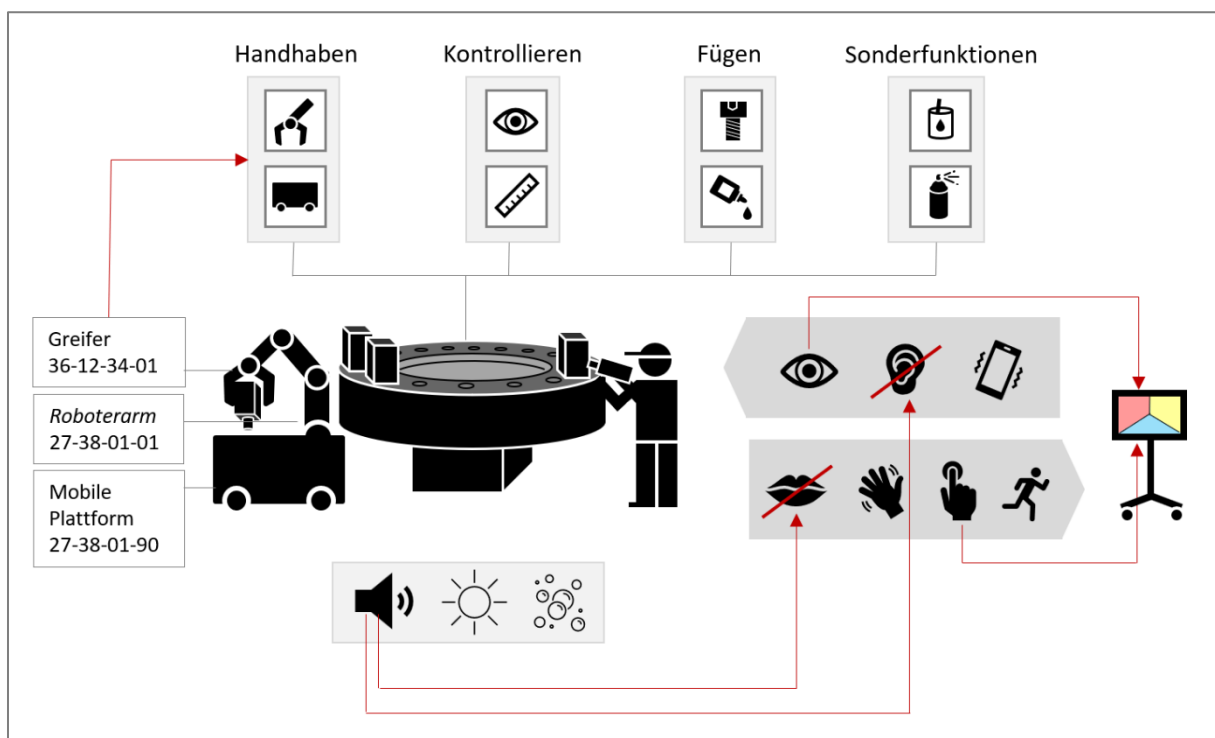
Um den Anwendungskontext mit dem theoretischen Rahmen zu verknüpfen, werden die vorher beschriebenen Theorien und Konzepte zur MRK, die auf den angewandten Kontext zutreffen, benannt und den jeweiligen Elementen zugeordnet. Dazu gehören die Kriterien zur MRK-Klassifizierung, die notwendigen Fähigkeiten für die Montageanwendung, der Grad der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, das Arbeitssystem, die Montageform und die Form der Interaktion.

Aus der MRK-Klassifizierung werden Kriterien abgeleitet, wie die Rolle des Menschen als *Kooperateur* oder die Aufgaben des Roboters zur Entlastung, Transport und Manipulation. Ebenso festgelegt ist die räumliche Nähe als *annähernd*, die zeitliche Nähe als *asynchron* und das Verhältnis Mensch-Roboter mit $N_M=N_R$. Als Fähigkeiten zur Montage des Behältertisches sind Handhabungsaufgaben wie Pick-and-Place und Transportieren von Bauteilen, Fügeaufgaben wie An-/Einpressen von Verbindungselementen, Kontrollieren (Messen und Prüfen) und Sonderfunktionen wie Einfetten von Bauteilen (z.B. Motorwellen und Schrauben) und Dosieren von Klebstoff, um Schrauben einzukleben. Der Grad der Zusammenarbeit ist größtenteils die Kooperation, weil sich Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsplatz teilen, grundsätzlich jedoch nicht am gleichen Bauteil arbeiten. Eine Kollaboration würde erfolgen, wenn der Roboter einen Servomotor hält, während die Werksperson den Motor festschraubt. Das Arbeitssystem bezogen auf den Anwendungskontext wurde bereits erläutert.

Die Montageform wird als Montage eines Großgeräts bezeichnet, als Baustellenmontage ausgelegt, denn das Montageobjekt *Behältertisch* bleibt stationär angeordnet. Die Interaktionsform wird als mobiles Objekt mit variabler Benutzungsschnittstelle definiert, da sie im Raum und in der Höhe bewegt werden kann. Der Gestalttyp ist eine Außengestalt, bei der die Benutzungsschnittstelle vom Objekt separiert ist.

Abbildung 16

Anwendungskontext und Zusammenhänge zwischen einzelnen Faktoren, die Einfluss auf den Kontext haben



Anmerkung. Die roten Markierungen zeigen die Beziehungen zwischen den Faktoren an. Elemente des Roboters, die durch die ECLASS klassifiziert wurden wirken sich auf die Fähigkeiten aus, die der Roboter besitzt. Die Arbeitsumgebung des Arbeitssystems wirkt sich auf die Sinnesmodalitäten aus, z.B. macht die laute Umgebung eine Sprachsteuerung überflüssig, und die Sinnesmodalitäten wirken sich auf die Benutzungsschnittstelle aus, so dass z.B. eine grafische Oberfläche notwendig ist, um Informationen sehen zu können.

2.5 Verknüpfung von Gestaltungsprozess und theoretischem Rahmen

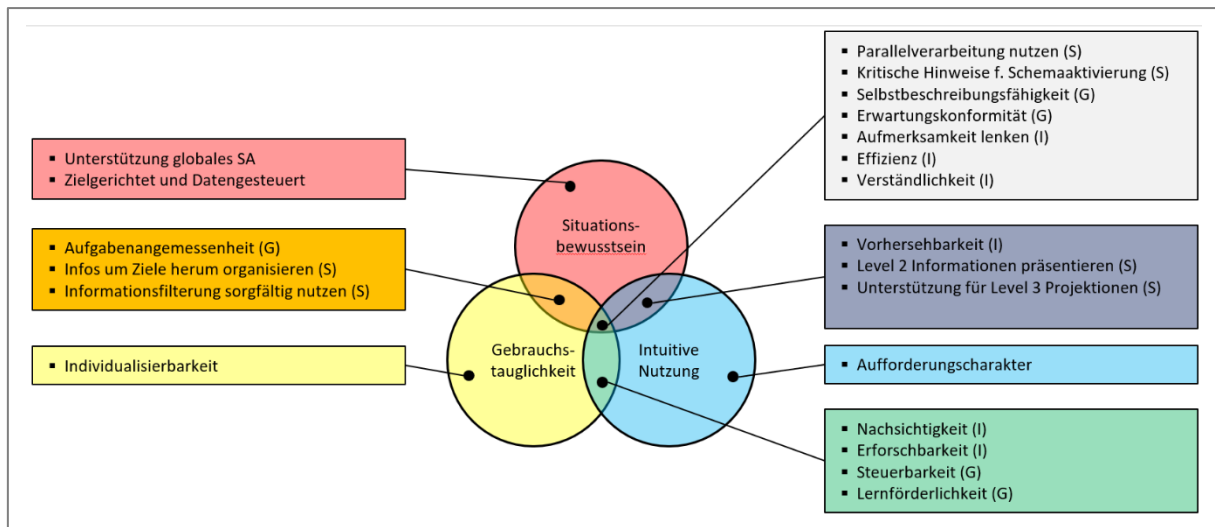
Nach Benennung relevanter nutzerzentrierter Gestaltungsansätze wird ersichtlich, dass die Prozesse meist iterativ sind und auf die drei Phasen Analyse, Gestaltung und Evaluation reduziert werden können. Das wurde zum einen durch Erfassung einer Schnittmenge zwischen

verschiedenen Prozessen ermittelt, zum anderen auch im Leitfaden zur Unterstützung der Gestaltung von gebrauchstauglichen Benutzungsschnittstellen für die MRK am Produktionsarbeitsplatz aufgefasst (Schleicher, 2018). Die wichtigen Konstrukte, die zur Gestaltung der GUI eingesetzt werden sollten, sind Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung. Situationsbewusstsein ist relevant, um grundlegende Informationen im dynamischen System zu identifizieren, die der Werksperson angezeigt werden sollten. Gebrauchstauglichkeit kommt zum Tragen, wenn die GUI in Gebrauch ist, um damit zu interagieren. Die intuitive Nutzung ist schließlich für die Roboterprogrammierung wichtig, um die richtigen Schritte mit wenig Anleitung und ohne fehlerhafte Bedienung durchzuführen. Der Gestaltungsansatz Research through Design kann bei der Entwicklung des Prozesses dazu verhelfen, die unterschiedlichen Konstrukte in einem Prozess zusammenzuführen. Auch die Implementierung von Methoden aus anderen Gestaltungsansätzen sind dadurch denkbar, wie z.B. Contextual Design und Design Thinking.

Wenn man die drei Konstrukte Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung bezogen auf deren Gestaltungsprinzipien betrachtet, fällt auf, dass es sowohl Überschneidungen als auch differenzierte Prinzipien zwischen den Konstrukten gibt. So ist das Gestaltungsprinzip für Aufgabenangemessenheit sowohl im Konstrukt Situationsbewusstsein als auch in der Gebrauchstauglichkeit enthalten. Das Prinzip der Erwartungskonformität ist in Gebrauchstauglichkeit als auch in intuitiver Nutzung enthalten. Die Empfehlung der Aufmerksamkeitslenkung ist bei allen drei Konstrukten vorhanden. Abbildung 17 zeigt schematisch die sich überschneidenden Prinzipien der drei Konstrukte.

Abbildung 17

Überschneidung der Gestaltungsprinzipien bei den Konstrukten Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung



Anmerkung. Die Darstellung ist das Ergebnis eines heuristischen Ansatzes und beruht auf Vermutungen des Forschenden, wie sich die Prinzipien der drei Konstrukte überschneiden.

In der Analyse werden die Interaktionspartner Mensch und Roboter untersucht. Die Untersuchung des Nutzerverhaltens liefert ein vollständiges Bild der Arbeitsaufgaben, der Zielgruppe und der Arbeitsumgebung (Zühlke, 2011, S. 39). Ein Ansatz der Analyse ist die Unterteilung in Zieldefinition, Grundidee und Nutzungskontext (Thesmann, 2016, S. 177). Zu den Analysemethoden gehören Feldbeobachtungen, Persona-Identifikation, strukturierte und freie Interviews (Zühlke, 2011, S. 47).

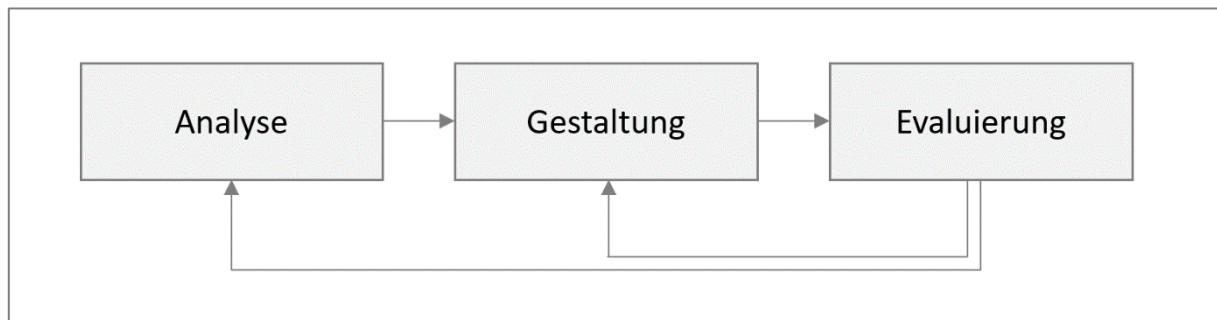
Die Gestaltungsphase befasst sich mit der Umsetzung der Anforderungen aus der Analysephase in eine Interaktionsplattform (Zühlke, 2011, S. 65). Ein Ansatz ist die Unterteilung in verschiedene Aspekte: Screendesign, Informationsdesign, Interfacedesign, Interaktionsdesign, Animationsdesign und Sounddesign (Stapelkamp T., 2007, S. 12). Die Methoden des Interface Designs lassen sich in Sketching und Prototyping unterteilen. Sketching umfasst manuelle Skizzen, computergenerierte Layouts, Storyboards und Wireframes. Prototypen können Papierprototypen, Videoprototypen, Wizard of Oz-Prototypen und physische Prototypen sein (Preim & Dachzelt, 2015, S. 115).

In der Evaluationsphase werden Testkriterien mit überprüfbaren Parametern für bestimmte Aufgaben definiert. Das Interface kann nur in vordefinierten Nutzungskontexten und in Abhängigkeit von bestimmten Nutzertypen evaluiert werden (Schlick et al., 2018). Bei den

Evaluationsmethoden wird zwischen quantitativen und qualitativen Methoden, heuristischen Evaluationsmethoden und allgemeinen Usability-Untersuchungsmethoden unterschieden (Stapelkamp T. , 2007, S. 315). Abbildung 18 zeigt den iterativen Prozess, bestehend aus Analyse, Gestaltung und Evaluierung schematisch auf.

Abbildung 18

Nutzerzentrierter iterativer Gestaltungsprozess, eingeteilt in Analyse, Gestaltung und Evaluierung



Anmerkung. Der Prozess ist iterativ, d.h. es ist möglich, von der Gestaltungsphase zur Analysephase und von der Evaluierungsphase zur Gestaltungs- oder Analysephase zurückzukehren. Die Methoden können jedoch bei jeder Iteration unterschiedlich sein.

3 Studie 1: Situationsbewusstsein für die mobile MRK

Die Texte und Abbildungen in diesem Kapitel basieren auf der Postprint-Version der folgenden wissenschaftlichen Arbeit:

Colceriu, C., Leichtmann, B., Brell-Cokcan, S., Jonas, W., & Nitsch, V. (2022, August). From task analysis to wireframe design: An approach to user-centered design of a GUI for mobile HRI at assembly workplaces. In 2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) (pp. 876-883). IEEE.

Die quantitative Studie zur Messung des Situationsbewusstseins in den Unterkapiteln 3.4.5 und 3.5.5 basiert auf folgender wissenschaftlicher Arbeit:

Colceriu, C., Theis, S., Brell-Cokcan, S. und Nitsch, V.: (2023) User-Centered Design in Mobile Human-Robot Cooperation: Consideration of Usability Engineering and Situation Awareness in GUI design for Mobile Robots at Assembly Workplaces. In i-com, 22(3), 193-213. <https://doi.org/10.1515/icom-2023-0016>

Der Doktorand war für das Verfassen aller Artikel sowie für die Koordination der wissenschaftlichen Arbeit verantwortlich. Die Mitautorenschaft hat gleichermaßen beratend und korrekturlesend beigetragen.

3.1 Hintergrund

Der erste Schritt, um das GUI für die mobile MRK zu gestalten, ist die Ermittlung relevanter Informationen, die auf dem Display angezeigt werden sollten. Dabei sollte das Situationsbewusstsein für eine effektive MRK in einem dynamischen System thematisiert werden (Marvel, Zimmermann, & Antonishek, 2020).

Ziel dieser Studie ist es, zu erarbeiten, wie ein Übergang von abstrakten Gestaltungsempfehlungen zu konkreten kontextspezifischen Schnittstellendesigns gestaltet werden kann und nutzerzentrierte Gestaltungsprozesse damit reproduzierbarer und zum Gegenstand der Reflexion im wissenschaftlichen Diskurs zu machen. Ebenso sollte ein Methodenmix evaluiert werden, der im GUI-Design üblich ist.

Bei der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen sind sowohl die Kenntnis der Aufgabe und Arbeitsumgebung als auch die Vorstellung über kognitive Anforderungen an die anzuwendenden Personen erforderlich. Dies ergibt sich aus einer Informationsdichte und dem

Automatisierungsgrad, die für technische Systeme in der Regel zunehmen. Die Benutzungsschnittstelle sollte dabei lediglich die relevanten Informationen geordnet nach ihrer Wichtigkeit ausgeben (Liggieri, 2014). Irrelevante und zu viele Informationen können aufgrund der begrenzten Arbeitsgedächtniskapazität (Wilhelm et al., 2013) menschlicher Nutzenden zu kognitiver Überlastung und schließlich zu Fehlern in der Arbeitsaufgabe führen (Brookings et al., 1996).

Verschiedene Möglichkeiten ergeben sich bei der Gestaltung der Informationsbereitstellung für grafische Benutzungsschnittstellen in Mensch-Roboter-Kooperationsszenarien. Die Wahl ist in dieser Arbeit auf die Anwendung der *Goal-Directed Task Analysis* (GDTA) gefallen, da sie für den Einsatz von Benutzungsschnittstellen in einem dynamischen System ausgelegt ist (Endsley et al., 2003).

Eine derartige informatorische Gestaltung von Benutzungsschnittstellen sollte auf das Situationsbewusstsein Nutzender ausgerichtet sein, wobei Situationsbewusstsein als psychologisches Konstrukt verstanden werden kann. Das Konstrukt Situationsbewusstsein wurde in Kap. 2.2.1 beschrieben: Situationsbewusstsein ist die Wahrnehmung der Elemente in der Umwelt innerhalb eines Raum- und Zeitvolumens, das Verstehen ihrer Bedeutung und die Projektion ihres Status in der nahen Zukunft.

Infolgedessen wird Situationsbewusstsein in 3 Ebenen unterteilt. Ebene 1 beschreibt die Erfassung der Attribute und die Dynamik der relevanten Elemente in der Umgebung. Ebene 2 ist das Verständnis der aktuellen Situation, basierend auf einer Synthese von nicht zusammenhängenden Elementen der Ebene 1 sowie das Verständnis der Bedeutung dieser Elemente in Bezug auf die zu erreichenden Ziele. Ebene 3, die höchste Ebene des Situationsbewusstseins, ist die Fähigkeit, zukünftige Aktionen der Elemente in der Umwelt zu projizieren. Durch die Kenntnis des Status und der Dynamik der Elemente sowie durch das Verständnis der Situation wird erreicht, zukünftige Zustände der Umgebung vorausszusagen (Endsley M., 1988).

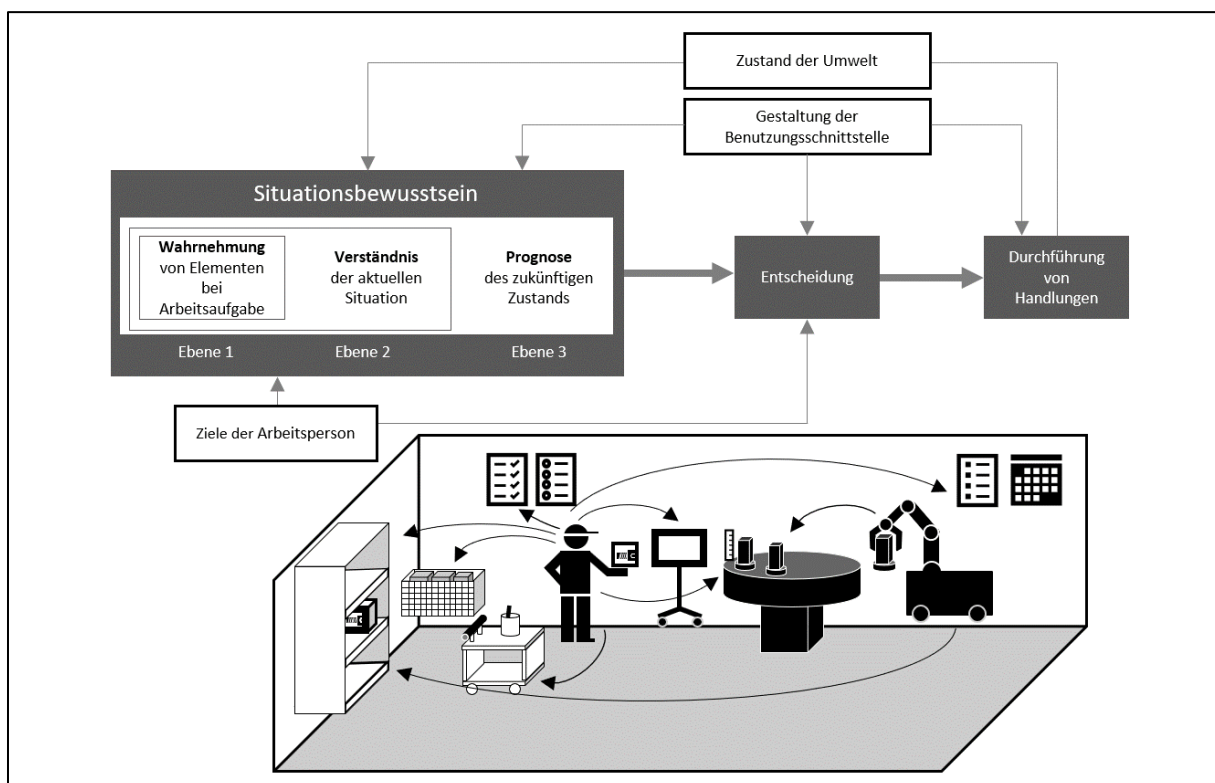
Situationsbewusstsein ist relevant für die menschenzentrierte Gestaltung in einem dynamischen System. In diesem Anwendungsfall ist die Dynamik vorhanden, da sowohl der mobile, kooperierende Roboter durch Lokomotion bei der Arbeitsaufgabe unterstützt, als auch die Arbeitsperson, die ihren Standort während der Durchführung der Aufgabe kontinuierlich ändert. Ebenso verhält sich der Arbeitsgegenstand dynamisch, der durch die Montage mehrmals seine Gestalt ändert.

Vor der Entwicklung einer Technologie ist daher eine genaue Analyse des Einsatzkontexts inklusive physischer Umwelt, der Arbeitspersonen, bis hin zum organisationalen System, in das der Interaktionskontext eingebettet ist, unabdingbar. Ohne eine solche Berücksichtigung des Kontexts kann die Einführung einer neuen Technologie schnell zu nicht-intendierten, negativen Konsequenzen führen (Tenner, 1997). Im Forschungsverbundprojekt *FORobotics* wurde daher als erster Schritt eine Arbeitssystemanalyse zur Untersuchung und systematischen Analyse der Ausgangslage (also eine Erfassung des Arbeitssystems vor der Einführung der geplanten Robotertechnologie) durchgeführt (Leichtmann, Schnös, Rinck, Zäh, & Nitsch, 2018). Ein Arbeitssystem beschreibt in diesem Zusammenhang dynamische, soziotechnische und stark vernetzte offene Systeme, die ein oder mehrere Arbeitskräfte, die Ausstattung, Funktionen, Aufgaben und Umgebungsfaktoren eines jeweiligen Arbeitsplatzes beinhalten (DIN EN ISO 6385:2016). Ziel dieser Arbeitssystemanalyse war es, eine erste Grundlage für empirisch-begründete Gestaltungsentscheidungen zu bilden, sowie um mögliche Chancen und Risiken bei einer späteren Einführung der Technologie schon frühzeitig abschätzen und entsprechend berücksichtigen zu können. Bezogen auf das Situationsbewusstsein können in diesem Schritt beispielsweise bereits erste Erkenntnisse gewonnen werden, welche arbeitsrelevanten Informationen beim Einsatz von Robotik unter Umständen verloren gehen könnten und durch eine Schnittstelle übermittelt werden müssen. Im Forschungsverbund *FORobotics* wurden 4 Arbeitssysteme bei 3 Anwenderunternehmen aus dem produzierenden Gewerbe über arbeitsbegleitende Beobachtungsinterviews, Dokumentenanalysen, Bilddokumentation, Videos und Fragebögen systematisch erschlossen. Hierfür wurden vorrangig einzelne passende Module aus den Leitfäden RIHA/VERA (Oesterreich et al., 2000) und KOMPASS (Grote et al., 2000) verwendet und teilweise um eigens entwickelte Module ergänzt, sodass möglichst viele verschiedene relevante Aspekte des Arbeitssystems erfasst werden konnten. Als ein Ergebnis dieser Analyse konnten beispielsweise besonders unergonomische bis hin zu monotonen Teilaufgaben identifiziert werden, die sich besonders für eine Übernahme von mobilen Robotern anbieten (Leichtmann, Schnös, Rinck, Zäh, & Nitsch, 2018). Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass im Falle einer Übernahme durch Roboter wichtige Informationen nicht verloren gehen. Die Werkskraft muss dennoch den Überblick über den Gesamtprozess am Montagearbeitsplatz behalten können. Besonders beim kooperativen Montieren muss daher die Robotertechnologie wichtige Informationen, die beispielsweise für das Verständnis des Gesamtprozesses von zentraler Bedeutung sind oder die eine Aktion durch die Werkkraft erfordern, an die Werkkraft weitergeben.

Dazu müssen entsprechende Informationen, die eine menschliche Werkskraft zum erfolgreichen Ausführen des Arbeitsauftrags in Kooperation mit der Roboterplattform benötigt, identifiziert werden. Ziel dieses Beitrages ist daher aufzuzeigen, wie sich Informationen in einem konkreten Anwendungsfall ermitteln lassen und aufbauend darauf, wie die entsprechend gewonnenen Informationen in einer grafischen Benutzungsschnittstelle zur mobilen Mensch-Roboter Kooperation in der Montage dargestellt werden können.

Abbildung 19

Die Gestaltung für Situationsbewusstsein ist notwendig, sobald ein komplexes, dynamisches System vorherrscht



Anmerkung. Der Entscheidungsfindungszyklus des Menschen erstreckt sich über die drei Stufen Situationsbewusstsein, Entscheidung und Durchführung von Handlungen. Dabei beeinflussen die Ziele der arbeitenden Person, der Zustand der Umgebung und die Gestaltung der Benutzungsschnittstelle die Entscheidung und die Durchführung der Handlung.

3.2 Verwandte Arbeiten

Der nutzerzentrierte Designprozess aus ISO 9241-210 (ISO, 2019) sieht als einen der ersten Schritte die Beschreibung des Nutzungskontexts vor. Dies erfordert eine Aufgabenanalyse. Zu

den bekanntesten Methoden der Aufgabenanalyse gehören die "Hierarchische Aufgabenanalyse" (Annett, 2003), die "Kognitive Aufgabenanalyse" (Barnard, 1987) oder die GDTA (Endsley, Bolté, & Jones, 2003). Diese drei Methoden haben sich als anwendbar für die Analyse von Mensch-Roboter-Interaktion erwiesen (Heydaryan, Suaza Bedolla, & Belingardi, 2018). Neuere Studien, die GDTA verwenden, beziehen sich auf nicht-robotische Themen (Sharma, Nazir, & Ernstsen, 2019; Taylor, et al., 2018). Zuvor wurde die GDTA-Methode auch in Arbeiten zur mobilen Robotik eingesetzt. Die meisten dieser mobilen Roboter wurden im Bereich der Suche und Rettung eingesetzt (Adams, 2006; Scholtz J. , 2002). GDTA wurde auf der Grundlage einer Aufgabenanalyse für Situationsbewusstsein in dynamischen Systemen entwickelt. Situationsbewusstsein ist von großer Bedeutung für nutzerzentriertes Design (Endsley, Bolté, & Jones, 2003).

Als weiterer methodischer Ansatz für eine Aufgabenanalyse in einer anderen Disziplin kann eine "Contextual Task Analysis" in Betracht gezogen werden. Dabei handelt es sich um eine Methode aus dem Prozess des Contextual Design für die Gestaltung im Sinne der Mensch-Computer-Interaktion (Holtzblatt & Beyer, 2017). Der Prozess beinhaltet auch die Visualisierungsmethode des Physical Models, um die Beziehung der Elemente zueinander zu veranschaulichen. Ein weiterer wichtiger Aspekt, um relevante Informationen für die Benutzungsschnittstelle zu erhalten, ist der Rahmen für die Beschreibung der Arten der menschlichen Roboterwahrnehmung (Drury, Scholtz, & Yanco, 2003). Dabei werden sowohl das Gesamtziel als auch das Bewusstsein für die Tätigkeit des Roboters als wichtig erachtet.

Um Situation Awareness bei einem User Interface zu messen ist die Anwendung verschiedener Methoden möglich. Es wurden die Situation Awareness Measurement Methoden ASAGAT, CARS, PASA, QUASAGAT, SAGAT und SPASA miteinander verglichen (Gatsoulis, 2008; Endsley M. R., Situation awareness global assessment technique (SAGAT), 1988). Ebenso wurde ein direkter Vergleich der beiden Methoden SAGAT und SART durchgeführt (Gatsoulis, Virk, & Dehghani-Sanij, 2010; Endsley, Selcon, Hardiman, & Croft, 1998). Diese sind meist Fragebogen-basiert und unterscheiden sich unter anderem dadurch, dass die Fragen entweder während der Versuchsdurchführung – durch kurzes Pausieren des Experiments - gestellt werden oder danach. Zur Bewertung von Performance und Nützlichkeit können dabei von 4-Punkt bis 7-Punkt-Likert-Skalen eingesetzt werden.

Die Arbeitssystemanalyse zur Untersuchung und systematischen Analyse der Ausgangssituation war die Grundlage dieser Arbeit, um eine erste Basis für empirisch fundierte Gestaltungsentscheidungen in Richtung eines nutzerzentrierten Designs zu schaffen. Ziel dieses

Beitrags ist es daher zu zeigen, wie ermittelt werden kann, welche Informationen für die Situationswahrnehmung im MRK am relevantesten sind und wie die gewonnenen Informationen in einem GUI für mobiles HRI dargestellt werden können. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der für die nutzerzentrierte Gestaltung von Bedienoberflächen für Roboter in verschiedenen Anwendungsfällen in einer dynamischen Umgebung verwendet werden kann. Um den Ansatz anschaulicher zu machen, wird er anhand eines konkreten Anwendungsfalles demonstriert. Die Forschungslücke, die sich aufgetan hat, ist die Frage, wie eine GUI von der Aufgabenanalyse bis zum Wireframe-Design für mobile MRK an Montagearbeitsplätzen gestaltet werden kann.

3.3 Motivation und Forschungsfrage

Vor der Nutzung der GUI muss die Werksperson die Umgebung und die für die Arbeitsaufgabe relevanten Informationen erfassen. In diesem dynamischen System ist das Konstrukt des Situationsbewusstseins wesentlich. Daraus ergibt sich die erste Forschungsfrage zur Entwicklung einer GUI:

FF1: Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI gestaltet werden, die das Situationsbewusstsein in der MRK bestmöglich unterstützt?

3.4 Methodik

Die Herangehensweise an den Entwurf der Benutzungsschnittstelle für den mobilen Roboter wird im weiteren Verlauf beschrieben. Es werden drei Methoden verwendet: die GDTA, das Physical Model und das Wireframe-Design. Das Ziel der GDTA ist es, die wichtigsten Informationsanforderungen zu identifizieren, die menschliche Arbeiter benötigen, um eine Aufgabe auszuführen, und diese Informationen in einer Zielhierarchie zu strukturieren. Das Physical Model ist ein Übergang von der theoretischen Zielhierarchie der GDTA zu einem visuellen Ergebnis. Der Entwurf des Wireframes ist die Umsetzung der theoretischen Erkenntnisse in ein visuelles Konzept der Benutzungsschnittstelle. Das Wireframe wird unter Berücksichtigung der Designprinzipien für Situationsbewusstsein (Endsley, Bolté, & Jones, 2003) und der Prinzipien für das Bewusstsein für die Mensch-Roboter-Interaktion (Drury, Scholtz, & Yanco, 2003) entwickelt. Im zweiten Schritt wird die Methodenkombination validiert. Diese Validierung der Methodenkombination besteht aus 1) der Bewertung des

Wireframe Designs mit Werkkräften und 2) der Replikation des Designprozesses mit Studierenden. Da sich das Wireframe in einer frühen Phase des Designprozesses befindet und nur eine kleine Stichprobe zur Verfügung steht, ist eine qualitative Bewertung angemessen. Im Anwendungsfall wird ein mobiler Montageroboter in einer Produktionsumgebung eingesetzt, um Nutzende bei einer Montageaufgabe zu unterstützen. Daher wird eine grafische Benutzungsschnittstelle entworfen, um eine effizientere MRK zu entwickeln, die das Situationsbewusstsein verbessert. Die Eingabemodalität der GUI ist dabei noch nicht definiert. Im Folgenden werden die angewandten Methoden der GDTA, Physical Model, Wireframe-Design und qualitative Evaluierung erläutert.

3.4.1 Methode der GDTA

Der erste Schritt der GDTA besteht darin, die Arbeitsaufgabe zu analysieren. Eine Feldbeobachtung wird durchgeführt, um Daten während der Arbeitsaufgabe zu sammeln. Die Methode ist explorativ und unstrukturiert und sollte in Verbindung mit Interviews und Dokumentenanalyse eingesetzt werden (Kopp, Langenhoff, & Schröder, 2000). Die Feldbeobachtung wird als teilnehmende Beobachtung durchgeführt, bei der die Forschenden in die Rolle des Arbeiters schlüpfen und die Arbeitsaufgabe ausführen. Per Fotodokumentation und Notizen zu den einzelnen Arbeitsschritten wird die Arbeitsaufgabe festgehalten. Zwei Bilder der Fotodokumentation sind in Auszügen in Abbildung 20 zu sehen. Ein weiterer Schritt ist das Leitfadeninterview mit Werkkräften aus der Montage, in dem die Teilnehmenden in qualitativen Einzelinterviews nach ihren Zielen bei der Durchführung der Arbeitsaufgabe befragt werden (Endsley, Bolté, & Jones, 2003). Um Anforderungen für das Situationsbewusstsein zu entwickeln, werden spezifische Fragen gestellt. Zum Beispiel schließt die Frage "Was müssen Sie wissen, um Ihre Entscheidung zu treffen?" auf eine Anforderung der Ebene 1, während die Frage "Wie gehen Sie mit dieser Information um?"

Abbildung 20

Teilnehmende Beobachtung bei der Durchführung der Arbeitsaufgabe, Auszug aus der Fotodokumentation



Sich auf Anforderungen der Ebene 2 für Situationsbewusstsein bezieht. Fragen wie "Woher wissen Sie, dass es richtig gemacht wurde?" führen zu Ebene 3. Die Interviews sollten die Entscheidungen aufdecken, die der Arbeiter getroffen hat, um die Teilziele zu erreichen. Die Teilnehmenden des Interviews (n=7) arbeitet in der Montageabteilung eines Produktionsunternehmens für Maschinen und Anlagen für die Getränkeindustrie. Die Interviews werden aufgezeichnet und transkribiert. Abbildung 21 zeigt den Interview-Leitfaden, der bei den semistrukturierten Interviews verwendet wurde.

Abbildung 21*Interview-Leitfaden der durchgeführten Einzelinterviews***Ausgangsfrage:**

Was sind die Ziele eines Behälter Tisch-Monteurs?

Alternativ: Wie sieht das Ergebnis aus, wenn die Aufgabe erfolgreich abgeschlossen ist?

Weiterführende Fragen:

1. Warum ist ... (ausgewählte Antwort der Ausgangsfrage) Dein Ziel?
2. Wie setzt Du Dein Ziel um?
3. Welche Informationen erhältst Du dabei?
Alternativ: Auf was achtest Du dabei?
4. Wie gehst Du mit dieser Information um?
5. Welche Entscheidungen musst Du dabei treffen?
6. Was musst Du wissen, um Deine Entscheidung zu treffen?

Zusätzliche Fragen:

1. Was wird dabei oft missachtet oder fehlerhaft umgesetzt?
2. Woher weißt Du, dass es richtig durchgeführt wurde?
3. Was machst Du, wenn dies nicht der Fall ist?

Von den sieben befragten Personen sind sechs männlich und eine weiblich, im Alter von 21-56 Jahren ($M=37.6$ Jahre, $SD = 14.6$), mit einer Berufserfahrung für die spezifische Arbeitsaufgabe von $M=2.6$ Jahren ($SD=1.6$). Der Inhalt der Transkripte wird in Zielhierarchien dargestellt. Gemäß der Methodik für die GDTA werden alle bis zu diesem Zeitpunkt erhaltenen Informationen so strukturiert, dass sie der Struktur der Zielhierarchie entsprechen, die in die folgenden Konzeptualisierungen unterteilt ist: übergeordnetes Bedienerziel, Hauptziel, Unterziel, Entscheidungen und Anforderungen für das Situationsbewusstsein. Die Ergebnisse wurden von $n = 13$ Fachkräften, ebenfalls Montagearbeitende, bestätigt. Sie wurden einzeln gebeten, fehlende Informationen oder Fehler in der Zielhierarchie zu identifizieren. Neun der validierenden Personen sind männlich und vier weiblich, im Alter von 20-59 Jahren ($M=34.8$ Jahre, $SD=14.6$) und haben eine Berufserfahrung für die spezifische Aufgabe von $M=1$ Jahr ($SD=0.9$).

3.4.2 Methode des Physical Models

Das Physical Model ist für Systeme relevant, bei denen sowohl die Gestaltung als auch die Nutzung des Raums von großer Bedeutung sind (Holtzblatt & Beyer, 2017). Der Raum wird abgebildet und die Beziehung zwischen den Informationen aus dem physischen Raum und der GUI hergestellt. Die daraus resultierenden dokumentenbezogenen Kategorien

veranschaulichen die Anforderungen an eine informationell-mentale Gestaltung der Bedienoberfläche. Das Physical Model stellt ein Hilfsmittel dar, um die benötigten Informationen zu erfassen und auf der Bedienoberfläche darzustellen. Zu diesem Zweck werden die Soll- und Ist-Informationen neu strukturiert und schematisch dargestellt, wo ihre Anordnung im Raum sein kann. Mit diesen erarbeiteten Erkenntnissen ist es möglich, ein prototypisches Wireframe für die Bedienoberfläche zu entwerfen.

Die Ergebnisse aus der GDTA werden in einem Anwendungsfall visualisiert, um die Gestaltung der Benutzungsschnittstelle zu unterstützen. Die Visualisierung des Anwendungsfalles dient dazu, Soll- und Ist-Informationen im Raum anzuordnen, um die Situation für den Informationsbedarf der Arbeitsperson zu veranschaulichen. Methoden der Visualisierung werden immer wieder in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben (Bühler, Schlaich, & Sinner, 2017). Meist geht es dabei um die Kommunikation mit einer bestimmten Zielgruppe, um bestimmte Informationen schnell lesbar zu vermitteln. In diesem Kontext soll den Forschenden selbst der Anwendungsfall veranschaulicht werden. Es werden Ergebnisse der GDTA aufgegriffen und neu strukturiert. Informationen werden dabei in Soll- und Ist-Informationen eingeteilt und kategorisiert. Es entstehen dokumentenbezogene Kategorien. Die Visualisierung des Anwendungsfalles präzisiert die Anforderungen an eine Benutzungsschnittstelle, welche Informationen zentral am Display abgebildet werden sollten, um die Arbeitsperson zu unterstützen. Es ist eine Hilfestellung, um konkrete Informationen, die benötigt werden, zu erfassen und zu verstehen, wie ihre Aufteilung im Raum ist. Sie bildet die Überleitung von der GDTA zum Wireframe-Design.

3.4.3 Methode des Wireframe Designs

Das Wireframe, auch Funktionslayout genannt, ist eine Form der Prototypenerstellung zur Darstellung einzelner Funktionselemente (Stapelkamp T. , 2010). Die Gestaltung des Wireframes basiert auf den Gestaltungsprinzipien für Situationsbewusstsein. Die acht Hauptprinzipien wurden in Kap. 2.2.1 beschrieben. Ein weiterer wichtiger Aspekt, um relevante Informationen für die Benutzungsschnittstelle zu erhalten und damit das Situationsbewusstsein zu erhöhen, ist der Rahmen für die Beschreibung der Arten von Mensch-Roboter-Bewusstsein (Drury, Scholtz, & Yanco, 2003). Dieses Rahmenwerk beschreibt, dass sowohl das Gesamtziel als auch das Bewusstsein für die Tätigkeit des Roboters wichtig sind.

Daraus ergeben sich zwei Punkte des MRI-Bewusstseins, um Informationen darzustellen, die in der Benutzungsschnittstelle angezeigt werden sollten, die wie folgt zusammengefasst werden: A. Der Mensch sollte über den aktuellen Standort, die Identität, die Aktivität und die

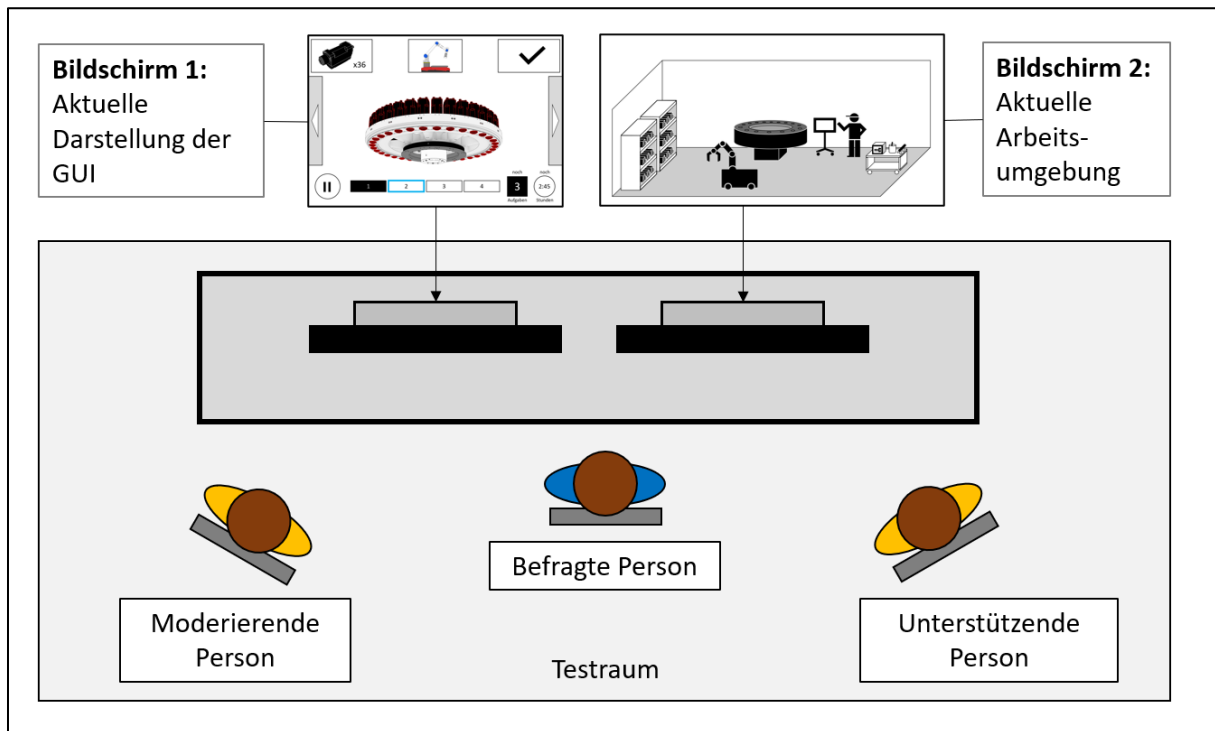
Umgebung des Roboters informiert sein. B. Der Mensch sollte den Status des Gesamtziels kennen und verstehen, ebenso wie die momentane Einschätzung des Fortschritts.

3.4.4 Methode der qualitativen Befragung zum Situationsbewusstsein

Um erste Einschätzungen über die Qualität der Wireframe-Inhalte zu erhalten und damit einen ersten Hinweis darauf, ob die Methodenkombination zu einer sinnvollen Lösung im Hinblick auf die abstrakten Prinzipien geführt hat, wurde eine qualitative Evaluation mit Montagearbeitenden durchgeführt. In halbstrukturierten Interviews wurden sie zu ihrem Verständnis der präsentierten Informationen befragt. Die Interviews wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring (Mayring, 2010) ausgewertet, indem die transkribierten Interviewaufnahmen paraphrasiert und kodiert wurden. Wiederholte Aussagen einer Person wurden herausgeschnitten. Es wurde ein Kodierleitfaden erstellt und die Häufigkeit des Auftretens der Kategorien in den Textpassagen in einem Diagramm aufgetragen. Der Kodierleitfaden enthält nummerierte Kategorien, die Definition einer Kategorie und ein Ankerbeispiel, in dem die Nummer der Befragung (vermerkt als S = survey) und die Seitenzahl der Textpassage vermerkt sind. Außerdem die Kodierregeln, wann eine Textstelle einer Kategorie zugeordnet wird und nach welchen Kriterien. Zwölf Werkkräfte nehmen an den Interviews teil. Neun Männer und drei Frauen, im Alter von 20 bis 59 Jahren ($M=35.6$; $SD=15$) mit einer Berufserfahrung von $M=16.4$ Jahren ($SD=14.8$).

3.4.5 Methode der quantitativen Studie zur Messung des Situationsbewusstseins

Der erste GUI-Entwurf, der als Wireframe entworfen und evaluiert wurde, soll das Situationsbewusstsein unterstützen. Mit Hilfe eines interaktiven Mockups kann das Situationsbewusstsein gemessen werden. Hier wurde eine Messung in Anlehnung an SAGAT (Endsley M., 1987) durchgeführt. Der Messaufbau besteht aus einem Testraum, in dem sich die Testperson, der Moderator und der Mediator befinden. Die Testperson sieht während der Messung zwei Bildschirme. Die Arbeitsaufgabe wird simuliert, indem auf einem Bildschirm die Situationen der einzelnen Arbeitsschritte dargestellt werden. Ein zweiter Bildschirm zeigt die aktuelle GUI. Abbildung 22 zeigt das Evaluierungs-Setup des kontrollierten Experiments.

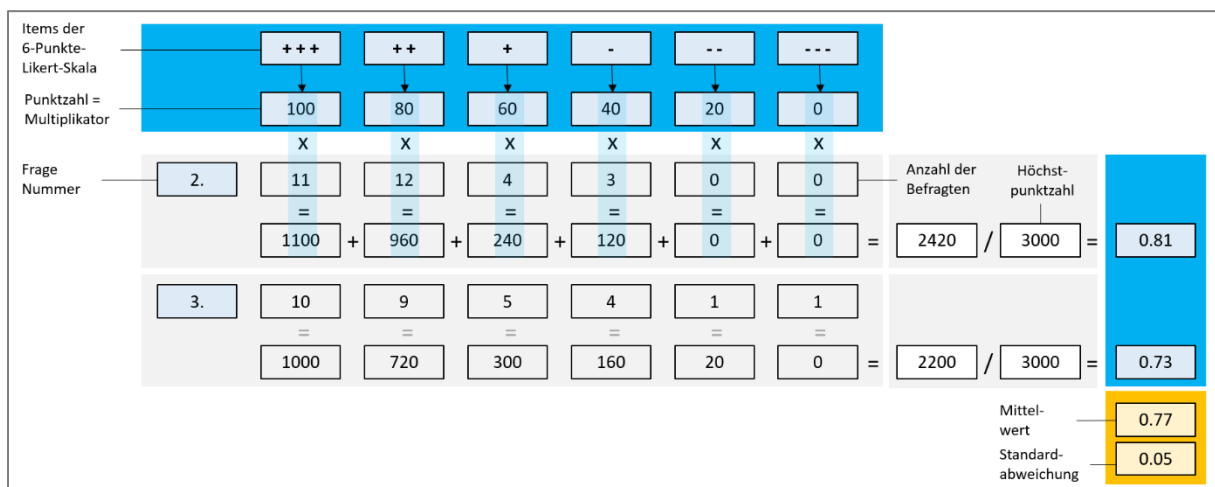
Abbildung 22*Evaluierungs-Setup des kontrollierten Experiments*

Die Testperson muss vier Arbeitsschritte ausführen und die auf der Oberfläche dargestellte Interaktion benennen. Die Leistung und das Situationsbewusstsein werden anhand von 20 Fragen gemessen. Die Fragen zum Situationsbewusstsein sind in Aufgabenbewusstsein (*Task Awareness* = TA) und Roboterbewusstsein (*Robot Awareness* = RA) unterteilt. Die Fragen beziehen sich auf die drei Ebenen des Situationsbewusstseins. Die Leistung wird von den Forschenden beurteilt. Die Performance wird von den Forschenden bewertet, indem sie "ja" ankreuzen, wenn die Frage erfolgreich beantwortet wird, und "nein", wenn die Frage nicht erfolgreich beantwortet wird. Nach jeder Frage wird die Testperson gefragt, wie nützlich sie die Informationen auf der grafischen Bedienoberfläche findet. Sie muss auf einer 6-stufigen Likert-Skala von "sehr hilfreich" bis "überhaupt nicht hilfreich" angeben, wie hilfreich die Informationen sind. Dies entspricht einer Punktzahl von 100 (sehr hilfreich) in Schritten von 20 bis 0 (überhaupt nicht hilfreich). Für jede Frage wird die Punktzahl mit der Anzahl der Personen, die diese Frage ausgewählt haben, multipliziert. Anschließend werden die Ergebnisse für jede Frage addiert und durch die maximal mögliche Punktzahl geteilt (maximale Punktzahl = 3000). Daraus ergeben sich die Situationsbewusstseinswerte für jede Frage. Die Werte werden in TA, RA und Gesamtwerte unterteilt. Für jede Frage werden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet. Abbildung 23 zeigt beispielhaft die Berechnung des Situationsbewusstseins.

Alle an der Studie teilnehmenden Personen arbeiten als Montagepersonal in der Produktion eines Unternehmens, das Maschinen und Anlagen für die Getränkeindustrie herstellt. Sie sind also die potenzielle Endnutzende der entwickelten GUI. Befragt wurden 30 Personen, davon 27 Männer und 3 Frauen, mit einem Alter zwischen 17 und 60 Jahren ($M=37.6$; $SD=13.38$) und einer Berufserfahrung in der Produktion zwischen 2 und 42 Jahren ($M=17.78$; $SD=12.35$).

Abbildung 23

Beispiel für die Berechnung des Situationsbewusstseins



Anmerkung. Für die Beschreibung der Berechnung werden exemplarisch Frage 2 und 3 mit ihren Werten aufgezeigt. Der Mittelwert und die Standardabweichung (rechts unten) ergeben sich aus den Ergebnissen der beiden Werte.

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Ergebnis der Goal-Directed Task Analysis

Die GDTA-Methode wurde zur Analyse der Arbeitsaufgabe und zur Auswertung der erhaltenen Daten verwendet. Der Behältertisch für die Etikettiermaschine ist eine Hauptbaugruppe, die als praktischer Anwendungsfall gewählt wurde. Die Arbeitsschritte enthalten folgende Aspekte:

In den Behältertisch werden größere Bauteile wie z.B. Servomotoren eingebaut, die in der Zahl zwischen 30 und 60 Stück pro Auftrag variieren. Die Bauteile müssen eingefettet und mit dem Behältertisch kreisförmiger Anordnung verschraubt und verkabelt werden. Mehrere kleine, teilweise vormontierte Bauteile und Baugruppen werden mit dem Behältertisch verbunden. Insgesamt sind es ca. 25 Arbeitsschritte, die zu tätigen sind.

Zur Unterstützung der montierenden Person wird als Demonstrator ein mobiler, kollaborierender Roboter eingesetzt. Dieser besteht aus einer mobilen Plattform, einem Industrieroboter-Arm und einem Endeffektor zum Greifen von Gegenständen. Die Montage des Behältertisches wird im Arbeitsalltag nur von einer Person durchgeführt. Für die Kooperation mit dem mobilen Roboter muss ermittelt werden, wie die Aufteilung der Montageanwendung erfolgen kann.

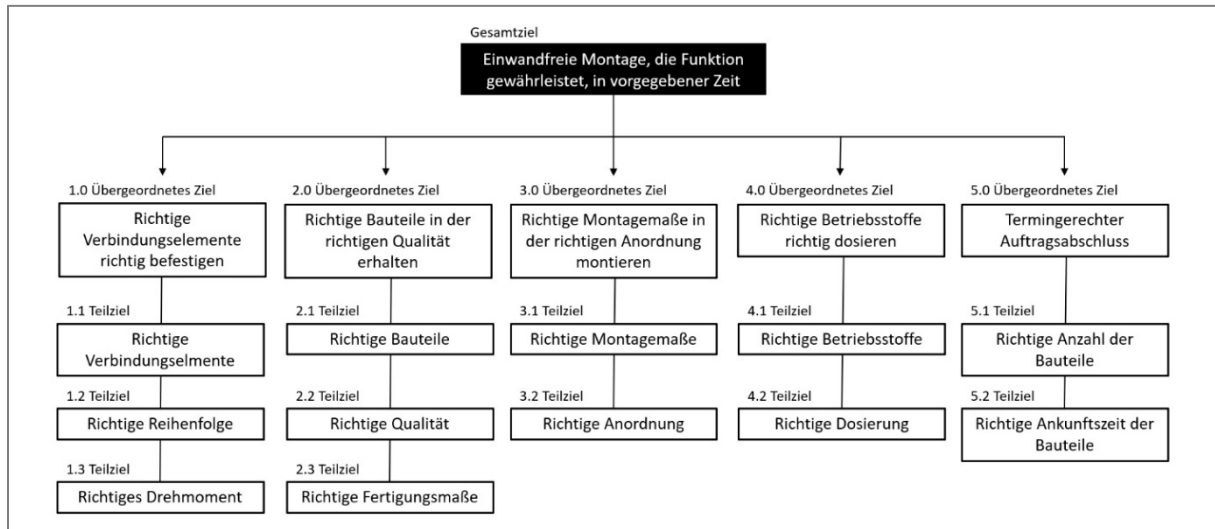
Als Interaktionsschnittstelle zwischen Werksperson und Roboter ist ein Display vorgesehen, bei dem die Form der Eingabe noch unbestimmt ist. Ein erster Ansatz ist ein Display, das auf einem rollbaren Stativ montiert ist.

Eine Erkenntnis aus den Interviews ist, dass ein übergeordnetes Ziel identifiziert werden kann, nämlich die "einwandfreie Montage in einer vorgegebenen Zeit, die die Funktionen sicherstellt". Hier wurden vorgegebene Antworten wie "Ziel ist es, eine saubere Arbeit, in guter Qualität und in der vorgegebenen Zeit abzuliefern" modifiziert und mit den Erkenntnissen aus der teilnehmenden Beobachtung in eine kohärente Leseform gebracht. Das Gesamtziel kann in mehrere Hauptziele unterteilt werden. Die Hauptziele sind z.B. die richtigen Verbindungselemente richtig zu befestigen, die richtigen Bauteile in der richtigen Qualität zu erhalten oder die richtigen Betriebsmittel richtig zu dosieren. Diese sind wiederum in weitere Teilziele untergliedert. Für jedes Teilziel wurden Fragen zu den zu treffenden Entscheidungen gestellt. Die Entscheidungen wurden den Teilzielen zugeordnet. Die Zielhierarchie enthält z.B. das Hauptziel "Richtige Verbindungselemente richtig befestigen" und die dazugehörigen, oben beschriebenen Teilziele.

Gesamtziel, Übergeordnete Ziele und Teilziele wurden in eine primäre Zielhierarchie eingetragen, wie sie in Abbildung 24 dargestellt ist.

Abbildung 24

Primäre Zielhierarchie, eingeteilt in Gesamtziel, Übergeordnete Ziele und Teilziele

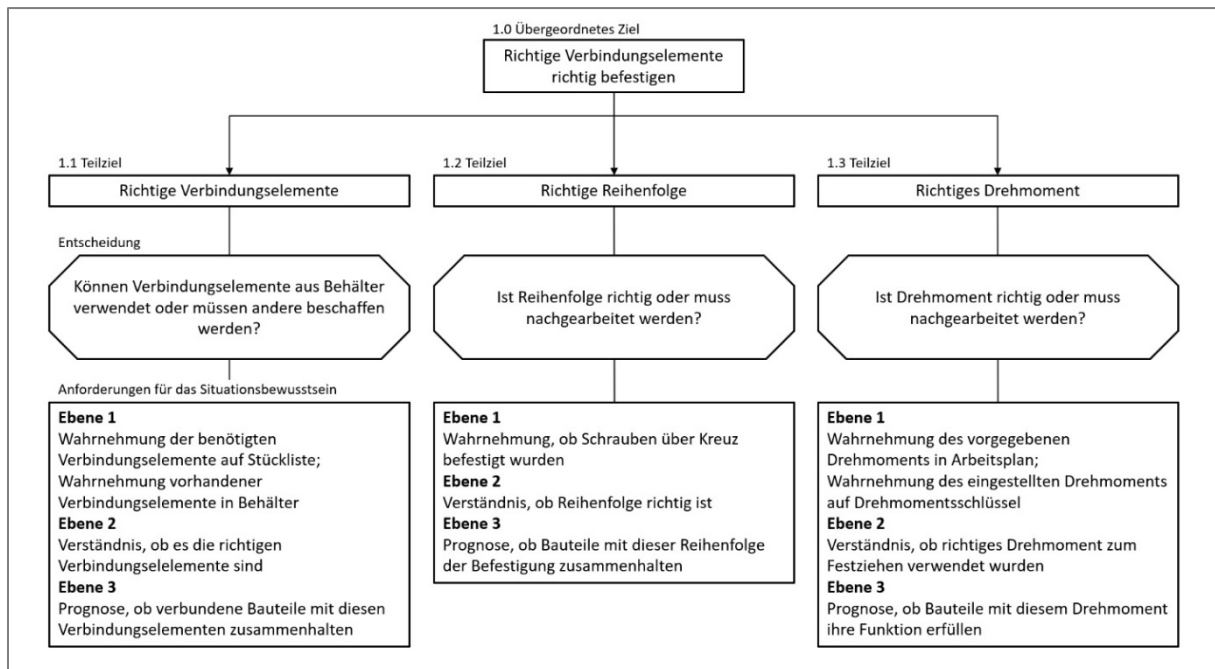


Bei jedem Teilziel wird nach den zu treffenden Entscheidungen gefragt. Die Entscheidungen werden in einer sekundären Zielhierarchie den Teilzielen zugeordnet. So enthält eine der sekundären Zielhierarchien das Übergeordnete Ziel „Richtige Verbindungselemente richtig befestigen“ und die dazugehörigen Teilziele, die weiter oben beschrieben wurden. Dem Teilziel „Richtige Verbindungselemente“ wird die Entscheidung zugeordnet, ob die Verbindungselemente aus dem Behälter verwendet werden können oder ob andere beschaffen werden müssen.

So muss die Arbeitsperson die benötigten Verbindungselemente auf der Stückliste wahrnehmen und mit vorhandenen Verbindungselementen im Behälter vergleichen (Ebene 1), um herauszufinden, ob sie miteinander übereinstimmen. Daraus ergibt sich ihr Verständnis darüber, ob es die richtigen Verbindungselemente sind (Ebene 2). Daraufhin schließt die Arbeitsperson ihre Prognose, ob die verbundenen Bauteile mit den vorhandenen Verbindungselementen zusammenhalten (Ebene 3). Die sekundäre Zielhierarchie mit dem Übergeordneten Ziel „Richtige Verbindungselemente richtig befestigen“ ist in Abbildung 25 dargestellt.

Abbildung 25

Sekundäre Zielhierarchie, eingeteilt in Übergeordnetes Ziel, Teilziele, Entscheidungen und Anforderungen für das Situationsbewusstsein

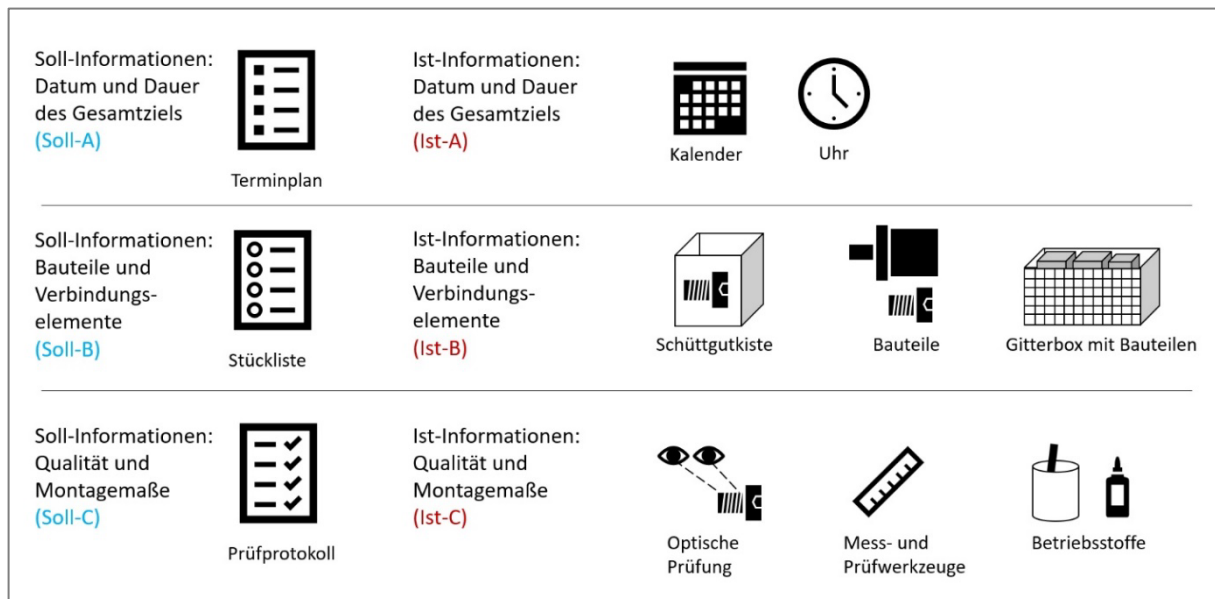


Anmerkung. Die Anforderungen für das Situationsbewusstsein enthalten die drei Ebenen Wahrnehmung, Verständnis und Prognose, bezogen auf das jeweilige Teilziel.

Die Werksperson muss die benötigten Verbindungselemente aus der Stückliste wahrnehmen und sie mit den vorhandenen Verbindungselementen im Container vergleichen (Ebene 1), um festzustellen, ob sie übereinstimmen. Daraus ergibt sich die Erkenntnis, ob es sich um die richtigen Verbindungselemente handelt (Ebene 2). Die Arbeitsperson trifft dann die Vorhersage, ob die verbundenen Komponenten mit den vorhandenen Verbindungselementen zusammenhalten werden (Ebene 3). Die vollständige Zielhierarchie kann hier eingesehen werden: <https://osf.io/vz9ea/>.

3.5.2 Ergebnis des Physical Models

Die Informationen aus den Ergebnissen der GDTA werden in Soll- und Ist-Informationen eingeteilt. Die entstandenen, dokumentenbezogenen Kategorien veranschaulichen die Anforderungen für eine informatorisch-mentale Gestaltung der Benutzungsschnittstelle. Abbildung 26 stellt die strukturierten Soll- und Ist-Informationen dar. *Soll-Informationen* sind Elemente, die Zustände oder Werte enthalten, die erreicht werden sollen. *Ist-Informationen* sind Objekte, die Zustände oder Werte enthalten, die aktuell gegeben sind.

Abbildung 26*Strukturierung der Elemente zur Erstellung des Physical Models*

Anmerkung. Auf der linken Seite befinden sich die Soll-Informationen, auf der rechten Seite die Ist-Informationen.

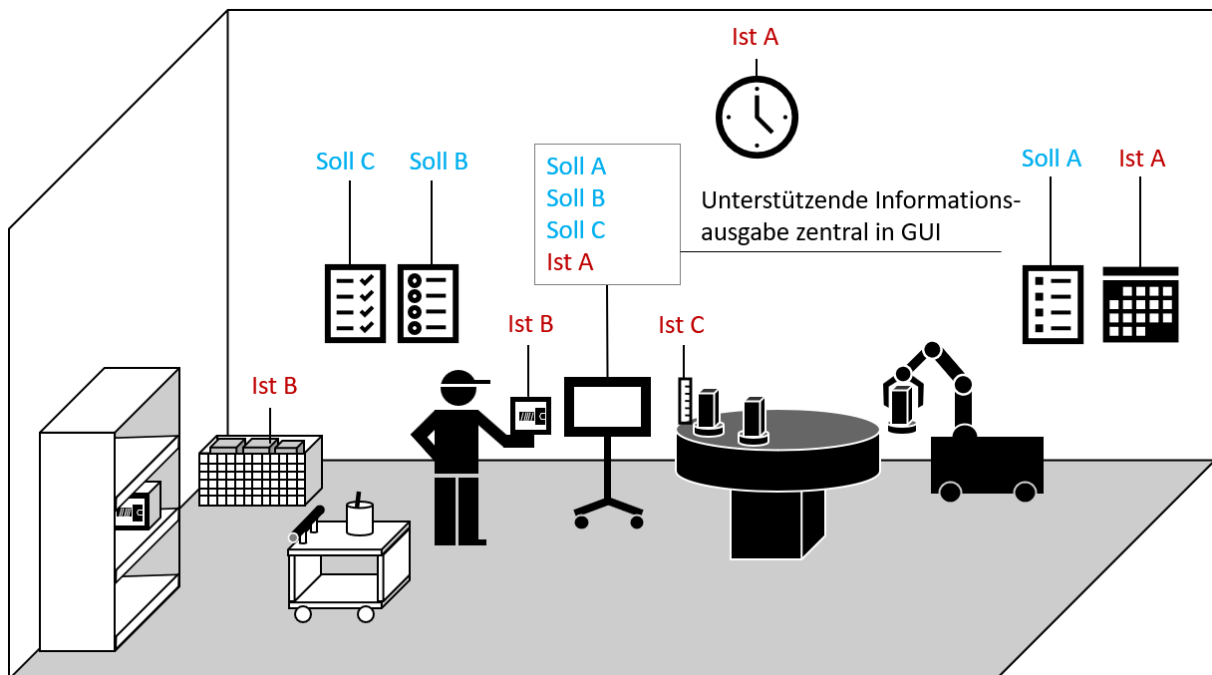
Soll-A beschreibt Soll-informationen in Form von Datum der Fertigstellung und Dauer des Gesamtziels. Die Soll-Informationen sind auf einem Terminplan abzulesen. *Ist-A* beschreibt die Ist-Informationen für das aktuelle Datum und die Uhrzeit. Das Datum ist im Kalender einzusehen, die Uhrzeit ist an der Wanduhr abzulesen. *Soll-B* beschreibt Soll-Informationen dafür, welche Bauteile und Verbindungselemente zu verwenden sind. Die Soll-Informationen sind auf einer Stückliste abzulesen. *Ist-B* beschreibt Ist-Informationen für die benötigten Bauteile und Verbindungselemente. Die Ist-Informationen sind in der unmittelbaren Umgebung zu identifizieren, indem die Bauteile durch die Arbeitsperson begutachtet werden. Beispiele für Ist-B-Informationen sind beschriftete Schüttgutkisten mit Verbindungselementen, gelagerte Bauteile in Regalen (z.B. Servomotoren) und Bauteile in der bereitgestellten Gitterbox. *Soll-C* beschreibt Soll-Informationen, die die Qualität von Bauteilen und Montagemaße betreffen. Diese Informationen sind auf einem Prüfprotokoll abzulesen. *Ist-C* beschreibt die Ist-Informationen von Qualität und Montagemaßen. Beispiele für Ist-C-Informationen sind die *optische Prüfung*, z.B. ob Bauteile frei von Kratzern, Schmutz und Lunkern sind, die *Prüfung durch Mess- und Prüfwerkzeuge* und die *Prüfung, ob die richtigen Hilfsstoffe verwendet werden*, z.B. lebensmittelverträgliche Schmierstoffe.

Abbildung 27 veranschaulicht die Raumsituation, in der Beispiele für Soll- und Ist-Informationen dargestellt sind. Die Soll-Informationen Soll-A (Terminplan), Soll-B

(Stückliste) und Soll-C (Prüfprotokoll), sind meist weiter weg vom Montageplatz positioniert, z.B. an einer Wand befestigt. So können sie abgelesen werden, wenn die Arbeitsperson unmittelbar davorsteht, jedoch nicht, wenn sie sich am Montageplatz befindet. Eine zentrale Abbildung der Soll-Informationen in der Benutzungsschnittstelle für die Mensch-Roboter-Kooperation würde eine effizientere Informationsaufnahme für die Arbeitsperson bedeuten. Die Ist-Informationen Ist-B (z.B. Einsatz der richtigen Bauteile) und Ist-C (z.B. Prüfen der Montagemaße) kann nur erfolgen, wenn der Roboter mit den Fähigkeiten ausgestattet ist, um die Ist-Informationen identifizieren zu können. Eine einfach umsetzbare Ist-Information ist in Ist-A zu finden, indem die Benutzungsschnittstelle Datum und Uhrzeit anzeigt. Die Uhrzeit liest die Arbeitsperson für gewöhnlich an der Wanduhr ab. Das Datum kann am Wandkalender eingesehen werden. Beides ist erforderlich, um Zieldatum der Fertigstellung und Dauer der Montage für das Gesamtziel errechnen zu können.

Abbildung 27

Physical Model mit Soll- und Ist-Informationen



Wie in den Methoden beschrieben, bietet das Physical Model eine Hilfestellung, um benötigte Informationen zu erfassen und zentral in der Benutzungsschnittstelle darzustellen. Dafür wurden die Soll- und Ist-Informationen neu strukturiert und schematisch dargestellt, wo ihre

Anordnung im Raum sein kann. Mit diesen erarbeiteten Erkenntnissen ist es möglich, ein prototypisches Wireframe für die Benutzungsschnittstelle zu gestalten.

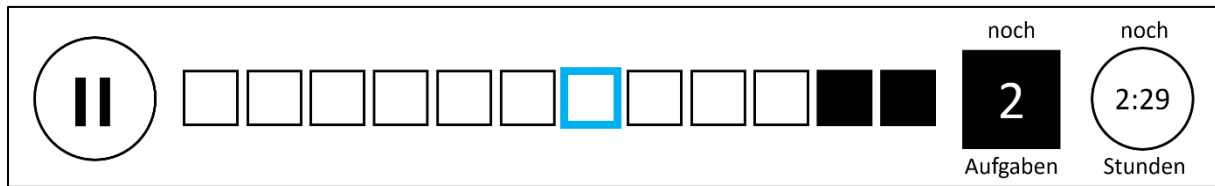
3.5.3 Ergebnis des Wireframe Designs

In die Gestaltung des Wireframes werden die Gestaltungsprinzipien für Situationsbewusstsein angewendet, die in Kapitel 2.2.1 beschrieben wurden. Ebenso werden die Prinzipien für das MRI-Bewusstsein, die Erkenntnisse aus der Zielhierarchie und des Physical Models implementiert.

Die Zielhierarchie der GDTA hat den Entwurf des Wireframe unterstützt. Unter anderem wurde das Gesamtziel identifiziert, nämlich die "fehlerfreie Montage von Elementen in einer bestimmten Zeit, die eine ordnungsgemäße Funktion gewährleistet". Es wurde die Reihenfolge der Wichtigkeit der Ziele erfasst, die nach den Designprinzipien für Situationsbewusstsein gestaltet wurden. Der Status des Gesamtziels sollte in der Benutzungsschnittstelle immer sichtbar sein.

So können Soll- und Ist-Informationen gebündelt werden und als Informationen der Ebene 2 für das Situationsbewusstsein in einer Statusleiste angezeigt werden. Bezogen auf das Gesamtziel ist die Ebene 1 die Wahrnehmung der zu bearbeitenden und der bereits bearbeiteten Arbeitsschritte. Ebenso die Wahrnehmung, welche Komponente gerade eingesetzt werden soll. Bei der Informationsebene 2 wird anstelle der Anzahl der erledigten Arbeitsschritte die Anzahl der zu bearbeitenden Arbeitsschritte angezeigt. Des Weiteren ist die Unterstützung durch Informationen der Ebene 3 implementiert. Diese wird in der Regel dadurch berechnet, dass die Mitarbeiter abschätzen, wie viel Zeit sie für die verbleibenden Aufgaben noch benötigen würden. Das Berechnen erhöht jedoch die mentale Arbeitsbelastung. Insofern bedeutet die Unterstützung bei der Berechnung der Restzeit eine mentale Entlastung.

Es findet sich das Prinzip, Informationen in Bezug auf das Gesamtziel zu organisieren, in der Anzeige wieder, die im unteren Bildschirmbereich die Übersicht über die Arbeitsschritte anzeigt. Hier werden die noch zu bearbeitenden Arbeitsschritte, der aktuelle Arbeitsschritt und bereits abgeschlossene Arbeitsschritte angezeigt, wie es Abbildung 28 aufzeigt. Das Gesamtziel wird, zur Unterstützung des globalen Situationsbewusstseins, immer angezeigt.

Abbildung 28*Wireframe-Design des Fortschritts der Gesamtmission und der übrigen Zeit*

Anmerkung. Die weißen Kästchen sind die erledigten Aufgaben. Die blaue Umrandung zeigt die aktuelle Aufgabe an, die schwarzen Kästchen sind die unerledigten Aufgaben.

Das Wireframe besteht aus drei Ansichten. Die Hauptansicht zeigt die Arbeitsaufgabe und welche Komponenten als nächstes montiert werden müssen. Sie entspricht dem Punkt B für das MRI-Bewusstsein, nämlich dem Verständnis über den Status des Gesamtziels.

Prinzip 2 empfiehlt die Unterstützung durch Informationen der Ebene 2. In Bezug auf das Gesamtziel ist Ebene 1 die Wahrnehmung der zu bearbeitenden Arbeitsschritte sowie der bereits bearbeiteten Arbeitsschritte, sowie die Wahrnehmung des Termins für das Erreichen des Gesamtziels und der aktuellen Zeit. Bei der Unterstützung durch Informationen der Ebene 2 wird, statt der aktuellen Zeit, die übrige Zeit angezeigt. Statt der Zahl der abgeschlossenen Arbeitsschritte wird die Zahl der zu bearbeitenden Arbeitsschritte angezeigt. Des Weiteren wird die Unterstützung durch Informationen der Ebene 3 empfohlen. In Anbetracht der vorhandenen Zeit zur Durchführung der Montagetätigkeit bedeutet dies, dass die Arbeitsperson darüber informiert wird, ob er für die übrigen Aufgaben noch ausreichend Zeit hat, ob die Zeit knapp wird oder ob die Zeit bereits abgelaufen ist. Dies wird für gewöhnlich von der Arbeitsperson selbst errechnet, indem sie abschätzt, wie viel Zeit sie noch für die übrigen Aufgaben benötigen würde. Gleichzeitig erhöht dies jedoch die mentale Arbeitsbelastung. Insofern bedeutet die Unterstützung durch die Benutzungsschnittstelle eine mentale Entlastung.

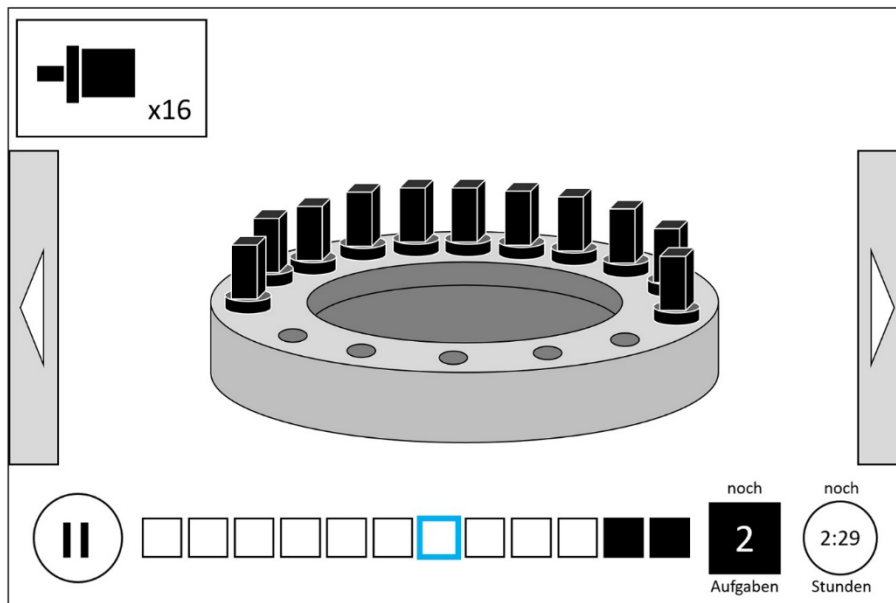
Das Prinzip, wichtige Hinweise für die Schemaaktivierung durch auffällige kritische Zustände zu geben, würde sich im Hinweis wiederfinden, dass nur noch wenig Zeit zur Durchführung der Arbeit übrigbleibt. Dieser Hinweis würde z.B. in einer Signalfarbe blinken. Das Prinzip vom Nutzen der Parallelverarbeitungsfunktionen würde angewandt werden, indem kritische Zustände zusätzlich zum Blinken einen Warnton abgeben würden.

Das Wireframe besteht aus drei Ansichten. Die Hauptansicht zeigt die Arbeitsaufgabe und welche Bauteile als nächstes montiert werden müssen. Sie entspricht dem zweiten Prinzip für das MRI-Bewusstsein (Der Mensch sollte das Wissen und Verständnis über den Status der

Gesamtmission, sowie die Momenteinschätzungen des Fortschritts, besitzen). Die Hauptansicht ist in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29

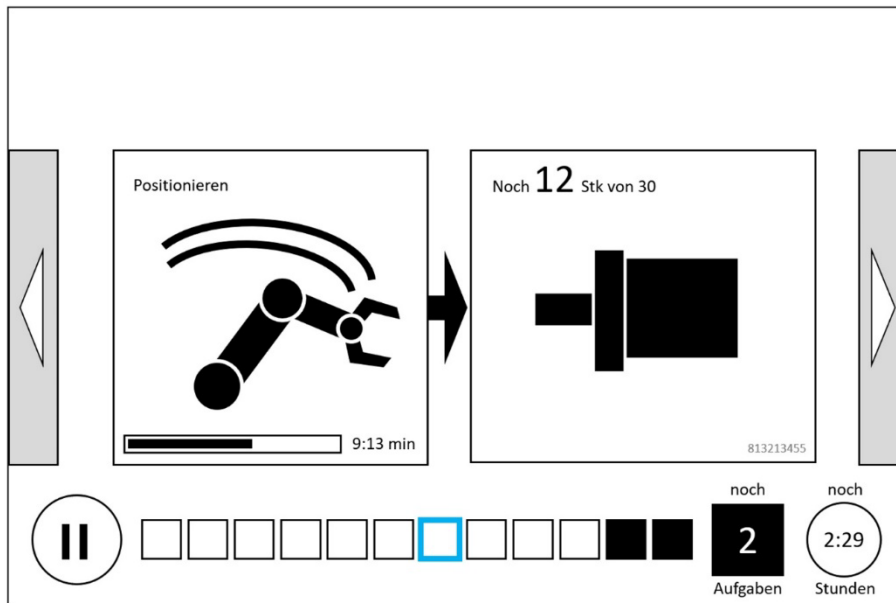
Wireframe-Design zeigt das Gesamtziel



Die zweite relevante Ansicht zeigt die aktuelle Tätigkeit des Roboters und entspricht dem ersten Prinzip des MRI-Bewusstseins (Der Mensch sollte das Wissen und Verständnis über den Status der Gesamtmission, sowie die Momenteinschätzungen des Fortschritts, besitzen). Um das Situationsbewusstsein zu unterstützen wird die Einschätzung, wie lange diese Roboter-Tätigkeit noch dauert (Situationsbewusstsein der Ebene 3), sowie das Bauteil, das von der Tätigkeit betroffen ist (Situationsbewusstsein der Ebene 1), die Anzahl der zu montierenden Bauteile bei der aktuellen Tätigkeit (Situationsbewusstsein der Ebene 2), in der Benutzungsschnittstelle angezeigt. In diesem Fall führt der Roboter die Tätigkeit des *Positionierens* durch. Er greift das Bauteil und platziert es an einem definierten Ort. Das Bauteil, das von dieser Tätigkeit betroffen ist, ist ein Servomotor, der sowohl als Bild dargestellt ist, um schnell und aus der Entfernung das Objekt zu erkennen, als auch textlich als Teilenummer, um sicher zu sein, dass es sich um das richtige Bauteil aus der Stückliste handelt. Die zweite Ansicht ist in Abbildung 30 zu sehen.

Abbildung 30

Wireframe-Design zeigt die aktuelle Tätigkeit des Roboters

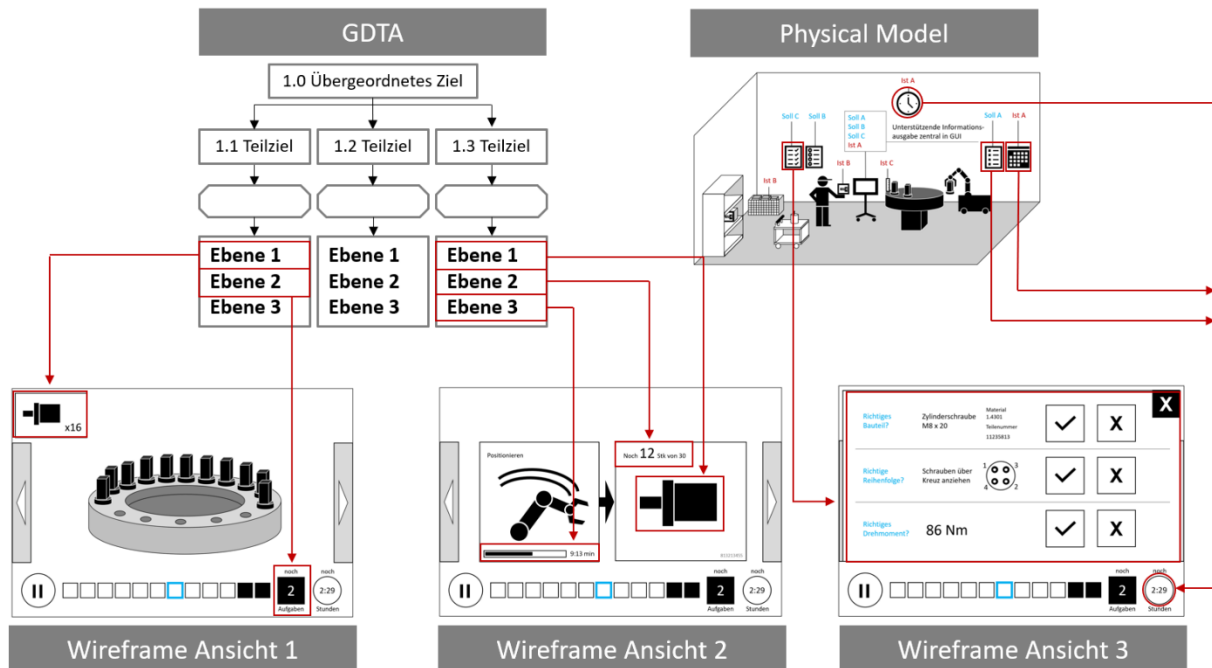


Anmerkung. Die GUI zeigt an, dass der Roboter aktuell die Servomotoren positioniert und noch 12 von 30 Stück zu positionieren hat. Dafür benötigt er voraussichtlich noch 9 Minuten und 13 Sekunden.

Die dritte benötigte Ansicht zeigt Merkmale zur Überprüfung, ob die Arbeitsaufgabe richtig durchgeführt wurde. Diese Merkmale sind für gewöhnlich in einem Prüfprotokoll einzutragen. Das Prüfprotokoll ist ein ausgedrucktes Dokument, das von den Werkskräften händisch auszufüllen und zu unterschreiben ist. Die Merkmale zur Überprüfung, die in der Benutzungsschnittstelle angezeigt werden, unterstützen die Arbeitsperson dabei, ihre Unterziele zu erreichen. Ein Beispiel dafür ist das Überprüfen der Verbindungselemente, ob es das richtige Bauteil ist, in der richtigen Reihenfolge montiert und ob es mit dem richtigen Drehmoment festgedreht wurde. Dieses Beispiel ist in Abbildung 31 dargestellt.

Abbildung 32

Zusammenhänge zwischen angewandten Methoden und Gestaltungselementen des Wireframes



3.5.4 Ergebnis der qualitativen Befragung zum Situationsbewusstsein

Bei der qualitativen Befragung wurden sechs relevante Faktoren identifiziert, die die Qualität des Wireframe-Inhalts beurteilen, d. h. ob der Inhalt als 1. verständlich, 2. unnötig, 3. unverständlich, 4. unterstützend, 5. vorteilhaft und 6. Beunruhigend empfunden wurde. Die Faktoren wurden wiederum in Unterkategorien von Aufgaben (z. B. Motorwellen schmieren, Roboter positioniert Servomotoren) und Informationen (z. B. Anzahl der verbleibenden Aufgaben, erforderliches Drehmoment) unterteilt. Ein Beispiel für ein Kodierleitfaden sieht wie folgt aus: Kategorie: 1.1 Nachvollziehbar, Aufgabe. Definition: Die befragte Person hat den dargestellten Inhalt richtig interpretiert. Ankerbeispiel: "Also die Aufgabe ist, zuerst den Motor zu schmieren, wegen dem Schmierschild oben würde ich jetzt sagen." (S3, S.1); "Ich denke, der nächste Schritt wird der Motor sein. 36 Mal. Da ist ein Schmiermittel oben links." (S4, S.1); Kodierregeln: Die befragte Person muss den erfragten Inhalt des Wireframes ohne Hilfsmittel korrekt wiedergeben. Die Ergebnisse der qualitativen Auswertung sind in Abbildung 33 dargestellt, in der die Faktoren und die Anzahl der Aussagen aufgelistet sind, die den Faktoren zugeordnet wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Wireframe im Allgemeinen aus verständlichen Elementen besteht. Nur wenige Informationen sind unverständlich (bei der Zeitanzeige wurden manchmal

Stunden mit Minuten verwechselt) oder unnötig (z.B. ist die Darstellung der Materialspezifikation für Schrauben nicht notwendig). Insgesamt empfinden die Beschäftigten auch mehr Elemente des Wireframes als unterstützend als unnötig, z.B. was beim Verschrauben von Bauteilen zu beachten ist. Einige der befragten Personen hatten auch weitere Ideen, welche Informationen noch angezeigt werden sollten, z.B. die genaue Position des Roboters. Nur eine Information wurde von einem der Teilnehmenden als störend empfunden: Die ständige Anzeige der verbleibenden Zeit würde für die Person Stress verursachen.

Abbildung 33

Ergebnisse der qualitativen Evaluierung des Wireframes mit Endnutzenden

1. Verständlich			4. Nicht notwendig	
1.1 Aufgabe	41		4.1 Aufgabe	5
1.2 Information	151		4.2 Information	14
2. Nicht verständlich			5. Wünschenswert	
2.1 Aufgabe	10		5.1 Aufgabe	5
2.2 Information	12		5.2 Information	45
3. Unterstützend			6. Störend	
3.1 Aufgabe	49		6.1 Aufgabe	0
3.2 Information	53		6.2 Information	1

Anmerkung. Die dunkelgrauen Textfelder entsprechen den Oberkategorien, die weißen Felder den Unterkategorien und die hellgrauen Felder enthalten die Anzahl der Aussagen in den Befragungen.

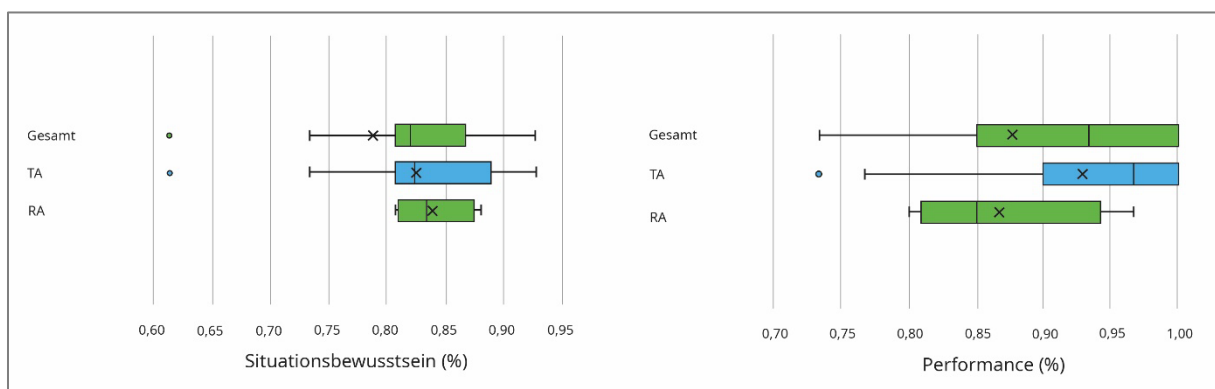
3.5.5 Ergebnis der quantitativen Studie angelehnt an SAGAT

Die Gesamt-Performance des kontrollierten Experiments beträgt $M=0.92$ ($SD=0.08$). Für die Task Awareness (TA) beträgt der Wert $M=0.93$ ($SD=0.08$) und für die Robot Awareness (RA) $M=0.87$ ($SD=0.07$). Dies sind sehr hohe Werte für ein erstes interaktives Mockup und deuten darauf hin, dass der Informationsgewinn sehr positiv war. Das allgemeine Situationsbewusstsein liegt bei $M=0.83$ ($SD=0.20$), was ebenfalls ein hoher Wert ist. Dies deutet darauf hin, dass die auf der Bedienoberfläche dargestellten Informationen nicht nur leicht

zu erfassen, sondern auch nützlich sind und somit das Situationsbewusstsein unterstützen. Dies gilt sowohl für die TA mit einem Wert von $M=0.82$ ($SD=0.20$) als auch für die RA mit einem Wert von $M=0.84$ ($SD=0.20$). Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der Messung des Situationsbewusstseins, aufgeteilt in einem Boxplot für Performance und einem für Situationsbewusstsein. Die Aufgaben wurden gut gelöst, am schlechtesten bei Aufgabe 6, die nur von ca. 73% der Teilnehmer gelöst wurde. Auch das Situationsbewusstsein war bei allen Aufgaben recht hoch. Es gibt keinen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen TA- und RA-Aufgaben in Bezug auf Leistung oder Situationsbewusstsein. Deskriptiv lässt sich jedoch feststellen, dass der Mittelwert der Leistung bei den TA-Aufgaben etwas höher und das Situationsbewusstsein bei den RA-Aufgaben etwas höher ist, was möglicherweise mit den neuen und ungewohnten Aufgaben im Zusammenhang mit dem Roboter zu tun haben könnte.

Abbildung 34

Ergebnisse der Messungen von Situationsbewusstsein und Performance



3.6 Ableitung einer Methodenkombination

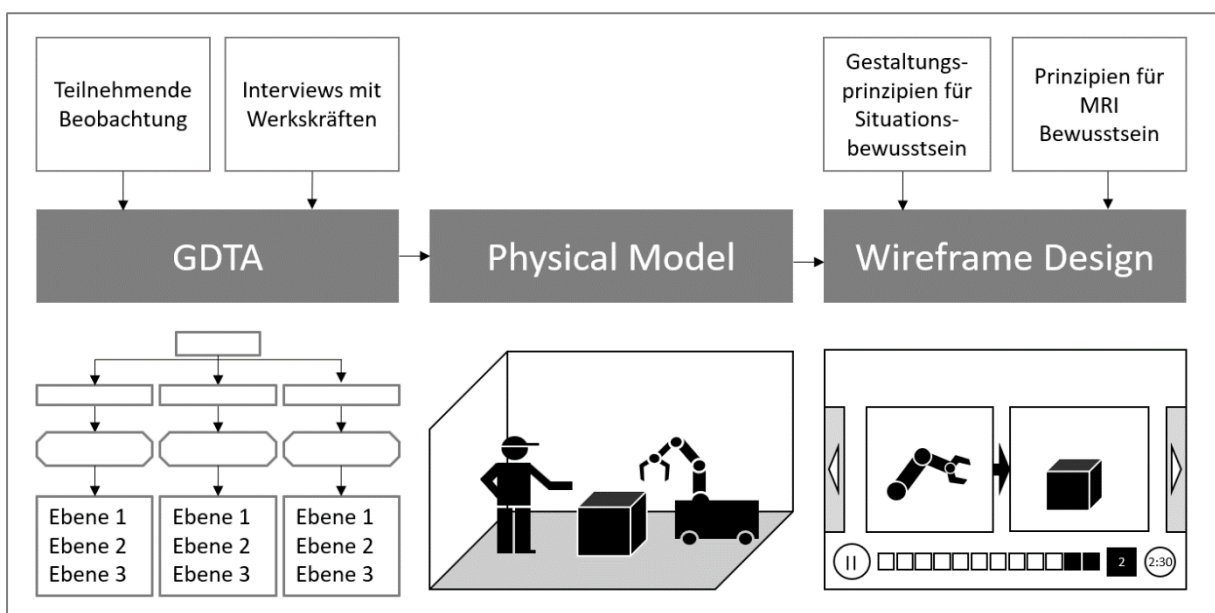
3.6.1 Beschreibung der Methodenkombination

Die in dieser Studie verwendeten Methoden wurden aus einer Kombination von Methoden der Konstrukte Situationsbewusstsein und dem Contextual Design-Prozess ausgewählt. Wenn die Umsetzung des Ansatzes auf eine abstrakte Ebene heruntergebrochen wird, ergibt sich ein dreistufiger Prozess, um vom Nutzungskontext zum konzeptionellen Design zu gelangen. Die drei Phasen sind die GDTA, das Physical Model und das Wireframe Design. Für die GDTA werden teilnehmende Beobachtung und qualitative Interviews mit Werkskräften, die Montagearbeitende sind, durchgeführt. Das Ergebnis der GDTA wird in Zielhierarchien

dargestellt, die aus dem Gesamtziel, den Hauptzielen, den Unterzielen, den Entscheidungen und den Anforderungen an das Situationsbewusstsein bestehen. Die Anforderungen für das Situationsbewusstsein werden in Ebene 1 (Wahrnehmung), Ebene 2 (Verständnis) und Ebene 3 (Projektion) unterteilt. Die zweite Phase ist das Physical Model, in dem die Artefakte und die daraus resultierenden Informationen strukturiert und in einem Modell der physischen Umgebung dargestellt werden. In der dritten Phase, dem Wireframe Design, werden die Informationen aus den ersten beiden Phasen unter Anwendung der Prinzipien für Situationsbewusstsein und des MRI-Bewusstsein implementiert. Eine schematische Darstellung des Prozesses ist in Abbildung 35 dargestellt. Die GDTA und das Physical Model sind Teil der Analysephase und das Wireframe Design ist Teil der Entwurfsphase.

Abbildung 35

Ansatz einer Methodenkombination zur nutzerzentrierten Gestaltung für Situationsbewusstsein für mobile MRK



3.6.2 Validierung der Methodenkombination

Um die Zuverlässigkeit im Sinne der Reproduzierbarkeit der Methodenkombination zu testen, wurde der Designprozess der GUI mit Studierenden verschiedener Fachrichtungen, die in der kreativen Entwicklung von Lösungen geübt sind (Designer/Entwickler), wiederholt. Um zu evaluieren, welche Methoden den Designprozess unterstützen, wurde der Prozess in drei Phasen durchgeführt. Die erste Phase wurde ohne Methodenvorgabe durchgeführt. Im Briefing wurde

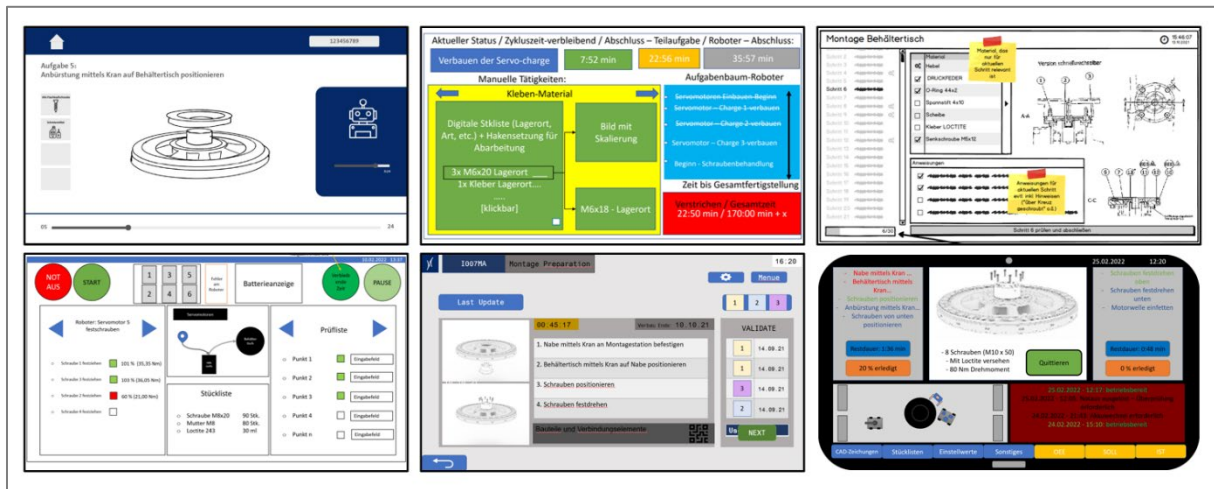
lediglich die Aufgabe gestellt, einen Wireframe für einen mobilen Roboter für HRI in der Montageaufgabe des Use Case zu entwerfen. Die Dokumentation der Aufgabenanalyse wurde ebenfalls in der ersten Phase veröffentlicht. In der zweiten Phase erhielten die Teilnehmer Informationen und Material zur Gestaltung des Situationsbewusstseins. Das Material beinhaltete die Definition des Situationsbewusstseins, die Zielhierarchie, die ersten 4 Gestaltungsprinzipien und die zwei Prinzipien, die für das HRI-Bewusstsein relevant sind. In der dritten Phase erhielten die Studierenden Informationen und Material über das physikalische Modell. Nach jeder Phase sollte ein Entwurf eines Drahtmodells erstellt werden, wobei keine Vorgaben zur Darstellungsform oder zu Softwaretools gemacht wurden. Zusätzlich wurde nach jeder Phase ein leitfadengestütztes, halbstrukturiertes Interview mit den Teilnehmern durchgeführt. Die Interviews wurden aufgezeichnet, transkribiert und mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring (Mayring, 2010) ausgewertet. Die Fragen bezogen sich sowohl auf die Unterstützung durch die Methode (z.B. "Inwieweit hat Sie das Physical Model unterstützt?") als auch auf die durch die Methode umgesetzten Elemente (z.B. "Welche Elemente wurden durch die Gestaltungsprinzipien der Situativen Achtsamkeit umgesetzt?"). Um die Kategorien eindeutig zuordnen zu können, wurde ein Kodierleitfaden erstellt, das in Definition, Ankerbeispiele und Kodierregeln unterteilt ist. An der Validierungsstudie nahmen zehn Design- und Ingenieurstudierende teil. Die Teilnehmenden waren zwischen 20 und 27 Jahre alt ($M=23.1$; $SD=2.0$), davon waren 7 männlich und 3 weiblich.

3.6.3 Ergebnisse der Validierung

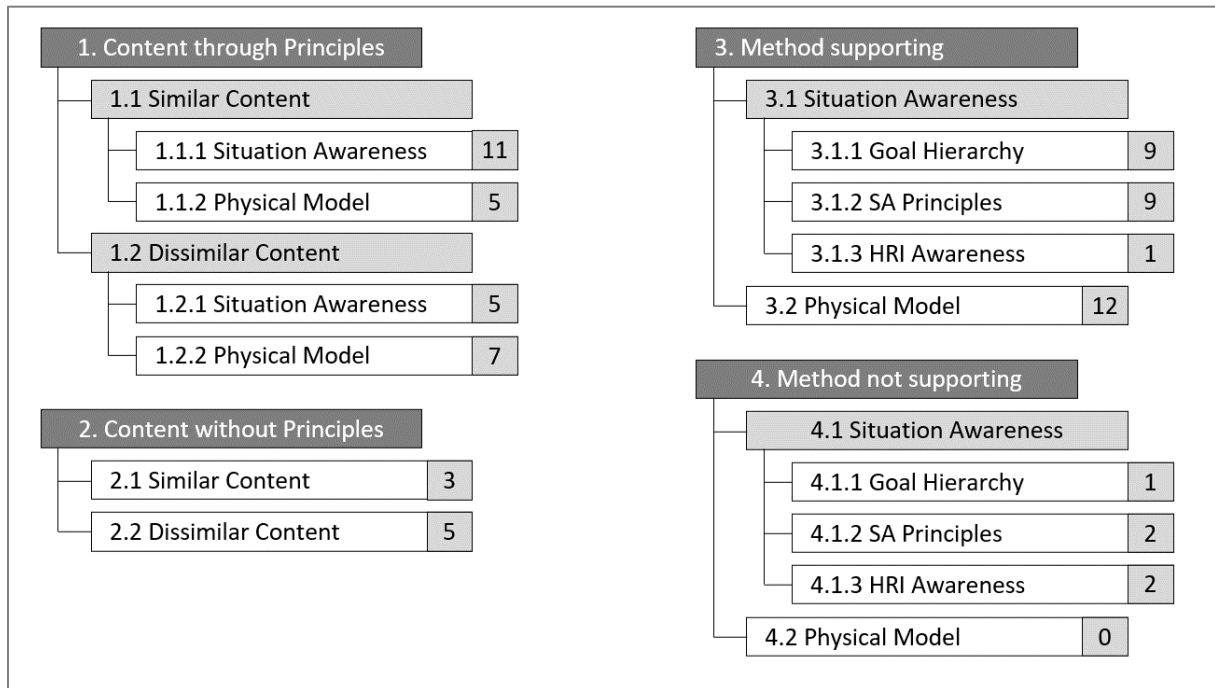
Bei der qualitativen Inhaltsanalyse wurden Kategorien gebildet, indem die vorhandenen Textstellen erfasst und die Anzahl der Textstellen in den Interviews notiert wurden. Aus den Entwürfen selbst ergaben sich mehrere Kategorien, in denen die Ähnlichkeit der Elemente mit den zuvor gebildeten Kategorien festgehalten wurde. Die operationalisierten Kategorien sind in einer Tabelle dargestellt und in die Oberkategorien "Inhalt", "Methode" etc. und Unterkategorien (ähnlicher Inhalt, Physical Model etc.) unterteilt. Abbildung 36 zeigt Beispiele für GUI-Designs, die bei der Durchführung der Methode durch Studierende herausgekommen ist.

Abbildung 36

Beispiele für GUI-Designs, die von Studierenden im Rahmen einer Validierung der Methodenkombination erstellt wurden.



Grundsätzlich waren alle Teilnehmer in der Lage, Elemente mit Hilfe der Situationsbewusstseinsmethode und des physischen Modells zu generieren. Die Methode, die die meisten neuen Inhalte erzeugte, war das Situation Awareness Design. Es wurden sowohl ähnliche als auch abweichende Inhalte zum ursprünglichen Drahtgitterdesign generiert. Dies deutet auf eine Tendenz zur Reproduzierbarkeit hin. Die Tatsache, dass auch unähnliche Inhalte generiert wurden, lässt den Schluss zu, dass die Methoden dennoch Gestaltungsfreiheit zulassen. Die meisten Elemente wurden unter Anwendung von Prinzipien erstellt. Es wurden aber auch Elemente ohne Anwendung von Prinzipien erstellt. Daraus kann geschlossen werden, dass verschiedene Teilnehmer es vorzogen, intuitiv und losgelöst von den Methoden zu entwerfen. Infolgedessen enthält der generierte Inhalt sowohl ähnliche als auch unähnliche Elemente. In Bezug auf die Unterstützbarkeit der Methoden wurden fast alle Methoden als unterstützbar eingestuft. Lediglich die Prinzipien des Bewusstseins für Mensch-Roboter-Interaktion (Verständnis des Gesamtzustandes des Ziels und der Aktivität des Roboters) sind den meisten Teilnehmern von vornherein klar und daher nicht hilfreich. Das physikalische Modell wurde am häufigsten als unterstützend angesehen, obwohl die Methode kaum neue Elemente hervorbrachte. Es half den Schülern jedoch, die GDTA besser zu verstehen. Abbildung 37 zeigt das Ergebnis der Validierung des Designprozesses mit Studierenden.

Abbildung 37*Ergebnis der Validierung des Designprozesses mit Studierenden*

Anmerkung. Die dunkelgrauen Textfelder entsprechen den Oberkategorien, die weißen Felder den Unterkategorien und die hellgrauen Felder enthalten die Anzahl der Aussagen in den Befragungen.

3.7 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, einen Ansatz zu beschreiben, der geeignet ist, relevante Informationen für eine Bedienoberfläche zu extrahieren, die ein hohes Situationsbewusstsein während der MRK mit einem mobilen Cobot unterstützt. Während es eine Reihe von abstrakten Gestaltungsempfehlungen gibt, wurde in dieser Arbeit eine Methodenkombination vorgestellt und validiert, die einen Übergang von abstrakten Empfehlungen zu konkreten kontextspezifischen Interface-Designs ermöglicht. Dazu wurden bekannte Methoden aus dem Bereich des nutzerzentrierten Designs angewendet und in den neuen, wenig erforschten Kontext der mobilen MRK in der Montagearbeit gestellt.

3.7.1 Interpretation der Ergebnisse

Als Methode für die Aufgabenanalyse wurde zunächst GDTA gewählt, da sie im Bereich der Gestaltung für Situationsbewusstsein in dynamischen Systemen empfohlen wird. Andere Methoden sind für den Einsatz in statischen Systemen konzipiert. So hieß die DIN EN ISO-Norm 9241 ursprünglich *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit*

Bildschirmgeräten. GDTA und Situationsbewusstsein beinhalten die Unterscheidung, dass die Phasen der Informationsverarbeitung in drei Ebenen unterteilt werden sollten. Dies wird in der Aufgabenanalyse, in der Formulierung der Interviewfragen sowie den Gestaltungsprinzipien für die Gestaltung der Bedienoberfläche aufgegriffen. Die Einteilung in Ebenen führt zu Ansätzen, an die man bei der Anwendung anderer Methoden wahrscheinlich nicht denken würde. Zur Erstellung der Zielhierarchien haben sich Vorarbeiten durch teilnehmende Beobachtung und Interviews mit Fachexperten als hilfreiche Methoden erwiesen, um sich mit der Arbeitsaufgabe vertraut zu machen. Diese Ansätze werden auch für andere Methoden wie Contextual Inquiry (Holtzblatt & Beyer, 2017) empfohlen. Da die GDTA allein keine problemlose Umsetzung für das GUI in der Praxis ermöglichte, wurde die GDTA in einem zweiten Schritt durch das physische Modell des Anwendungsfalls ergänzt. Dies unterstützte den Übergang vom Anwendungskontext zum Wireframe-Design als dritten Schritt. Bei der Erstellung des Wireframe-Designs wurden Designprinzipien für Situationsbewusstsein systematisch mit Hilfe der Informationen aus den GDTA-Zielhierarchien umgesetzt. Ebenso ergaben die Informationen aus GDTA, dass die Prüfung der Arbeitsaufgaben sehr wichtig ist und getrennt von den anderen Darstellungen zu dem Zeitpunkt und in der Menge angezeigt werden sollte, in der sie benötigt wird. Der Ansatz *Research through Design* wurde angewandt, indem der Prozess explorativ durchgeführt und interdisziplinäre Methoden und vorläufige Designartefakte wie das physische Modell und das Wireframe als Medien im Forschungsprozess verwendet wurden.

Nach Anwendung der Methodenkombination aus GDTA, Physical Model und Wireframe-Design zur Gestaltung einer Schnittstelle für mobile MRK bei Montagearbeiten wurde dieser Ansatz evaluiert und validiert. Die Bewertung des Wireframes mit Montagearbeitern zeigte, dass die angezeigten Aufgaben und Informationen in diesem Anwendungsfall grundsätzlich verständlich und unterstützend sind. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass das Wireframe weiter verbessert werden kann, da die Arbeiter einige wünschenswerte Elemente nannten, die noch nicht im Wireframe enthalten sind. Um das Wireframe-Design zu verbessern, könnte eine Lösung darin bestehen, einen Kreislauf von Anpassungen und Bewertungen fortzusetzen, bis das Design als akzeptabel angesehen wird. In der Validierung, der Replikation des Entwurfsprozesses mit Studierenden, wurde eine klare Tendenz festgestellt: Die Methodenkombination wurde von den Teilnehmenden im Allgemeinen als unterstützend für den Entwurfsprozess empfunden. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die systematische Anwendung der Methodenkombination zwar zu vielen ähnlichen Elementen führt, es aber auch

genügend Freiheiten für die Gestaltenden gibt, die eine gewisse Heterogenität in den Designumsetzungen ergeben hat.

Mit dem interaktiven Mockup konnte eine Messung des Situationsbewusstseins durchgeführt werden, die zum einen zeigte, dass das Interface zu hohem Situationsbewusstsein führt, zum anderen konnten Verbesserungsvorschläge von Endnutzern gesammelt werden. Aus der Vielfalt der Methoden zur Messung des Situationsbewusstseins (Gatsoulis, 2008) (Gatsoulis, Virk, & Dehghani-Sanij, 2010) (Endsley, Selcon, Hardiman, & Croft, 1998) (Endsley M. R., 2021) wurde die SAGAT-Methode so modifiziert, dass sie eine 6-Punkte-Likert-Skala enthält, die sich als valider Ansatz erwiesen hat.

3.7.2 Limitationen

Der Schwerpunkt dieser Studie lag darauf, die relevanten Elemente zu finden, die geeignete Informationen für eine Gestaltung enthalten, die das Situationsbewusstsein fördert. Die Eingabemodalität ist in dieser Arbeit nicht relevant, da der Schwerpunkt auf dem Empfang von Informationen liegt. Obwohl hier ein Touch-System gewählt wurde, könnte es durch jede andere Eingabefunktion ersetzt werden, z.B. Maus und Tastatur, Gestensteuerung oder Sprachsteuerung. Neben den Gestaltungsprinzipien für die Situationswahrnehmung ist auch der Einsatz von präattentiven Funktionen zur Entlastung des Arbeitsgedächtnisses erwähnenswert (Theis, 2019). Sie wurden aus Zeitgründen nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wurde die Methodenkombination in einem spezifischen Nutzungskontext der Fertigung validiert, weitere Studien sollten ihre Validität auch in anderen Kontexten testen und die Replizierbarkeit und Generalisierbarkeit des Prozesses evaluieren.

4 Studie 2: Gebrauchstauglichkeit für die mobile MRK

Die Texte und Abbildungen in diesem Kapitel basieren auf der Preprint-Version der folgenden wissenschaftlichen Arbeit:

Colceriu, C., Theis, S., Brell-Cokcan, S. und Nitsch, V. (2023): User-Centered Design in Mobile Human-Robot Cooperation: Consideration of Usability Engineering and Situation Awareness in GUI design for Mobile Robots at Assembly Workplaces. In i-com, 22(3), 193-213. <https://doi.org/10.1515/icom-2023-0016>

Der Doktorand war für das Verfassen des Artikels sowie für die Koordination der wissenschaftlichen Arbeit verantwortlich. Die Co-Autorinnen waren als wissenschaftliche Beratende und Korrekturlesende tätig.

4.1 Hintergrund

Im Rahmen der Untersuchung zum zukünftigen Einsatz von mobilen, ad-hoc kooperierenden Roboterteams für Industrieanwendungen (Berger, et al., 2021) adaptiert die vorliegende Arbeit bestehende Verfahren zur nutzendenzentrierten Entwicklung für die Gestaltung einer grafischen Benutzungsschnittstelle (GUI) für die mobile MRK. Hierbei wird für die MRK eine Benutzungsschnittstelle gestaltet, die den Menschen bei der Arbeitsaufgabe am Montagearbeitsplatz unterstützen soll. Der Demonstrator wurde exemplarisch programmiert, um Servomotoren aus einem Regal zu nehmen und in einen Behälter der Reihe nach einzusetzen. Dies entspricht einem der Arbeitsschritte, die heute von Montagepersonen durchgeführt werden. Die Werkperson führt parallel dazu Montageschritte durch, z.B. Motorwellen einfetten und eingesetzte Servomotoren verschrauben. Sie hat während der MRK immer die Tätigkeit des Roboters und dessen aktuellen Status mit Hilfe der GUI im Blick, sowie das Gesamtziel der Montageaufgabe. Da es sich hier um ein dynamisches System handelt, ist das Konstrukt Situation Awareness von hoher Relevanz. Das wurde bereits bei der Gestaltung des Wireframes in Studie 1 mit einbezogen. Bei der Bedienung des GUI während der Montage ist auch die Gebrauchstauglichkeit von hoher Relevanz. Dieser Aspekt wird in dieser Studie betrachtet und evaluiert.

Als Vorarbeit zur Gebrauchstauglichkeit ist auch zu erarbeiten, über welche Eingabeformen zur Bedienung des GUIs eingesetzt werden sollten (z.B. Tastatureingabe, Spracheingabe) und in welchen Situationen die Endnutzenden bereits diese Eingabeformen angewandt haben.

4.2 Verwandte Arbeiten

Bisherige Arbeiten zum Thema mobile MRK sind hauptsächlich technologieorientiert (Berg, Lottermoser, Richter, & Reinhart, 2019; Intisar, Khan, Islam, & Masud, 2021; Siregar, Syahputra, & Mustar, 2017). Ansätze, die nutzerzentrierte Gestaltung verfolgen, greifen auf die (DIN EN) ISO 9241-110 zurück. So wurde zum Beispiel ein Service-Roboter für Kunden in einem Baumarkt entwickelt. Hierbei fand eine Evaluierung durch Endnutzer in einem Feldtest statt. Die Implementierung der Prinzipien wird nicht näher beschrieben (Doering, et al., 2015) (Poeschl, Doering, Boehme, & Martin, 2009). Bezogen auf die Mensch-Roboter-Kooperation wird auch an einem Regelkreismodell für menschenzentrierte Gestaltung geforscht. Der Kontext ist allgemein gehalten, es wird nicht von einem mobilen Roboter im Montagekontext gesprochen (Nelles, Brandl, & Mertens, 2018). Für einen Roboterarm, der an einem Rollstuhl befestigt wurde, wurden grafische Benutzungsschnittstellen gestaltet und mittels *System Usability Scale* Fragebogen getestet (Rupp, Parkhurst, & Smither, 2016). Für einen mobilen Roboter zur Altenpflege, der von einer Pflegekraft ferngesteuert wird, wurde eine Nutzungsschnittstelle entwickelt, bei der sowohl Situationsbewusstsein als auch Gebrauchstauglichkeit evaluiert wurde. Hierbei wurde der Workload mittels Befragung erfasst, als Assessment Tool wurde *NASA-TLX* angewandt. Die Usability wurde mittels *System Usability Scale* Fragebogen ermittelt und das Situationsbewusstsein wurde durch Anwendung der Methode *3D-SART* gemessen (Olatunji, et al., 2022). Ein Leitfaden zur Unterstützung der Gestaltung von gebrauchstauglichen Benutzungsschnittstellen für die Mensch-Roboter-Kollaboration am Produktionsarbeitsplatz wurde entwickelt, bei dem die Prozessphasen in Analyse, iterative Gestaltung und Evaluierung eingeteilt wurden (Schleicher, 2018). Die nutzungszentrierte Gestaltung einer GUI für die Mensch-Roboter-Kooperation wurde ebenso für mechanische Fügeprozesse in der Flugzeugendmontage untersucht (Schmatz, Beuss, Sender, & Fluegge, 2020). Ein iterativer, nutzungszentrierter Gestaltungsprozess bei der Mensch-Roboter-Interaktion wurde auch auf die landwirtschaftliche Nutzung bei einem Roboter für agrikulturelles Weinberg-Spritzen angewandt (Adamides, et al., 2017), bei der eine heuristische Evaluation durchgeführt wurde. Die iterative Gestaltung eines gebrauchstauglichen mobilen Assistenzsystems für Instandhaltende verwendet Gestaltungsrichtlinien und Normen zur Software-Ergonomie (Waechter, Hoehnel, Loeffler, & Bullinger-Hoffmann, 2017).

Die nutzerzentrierten Ansätze beziehen sich jedoch nicht auf die gleichen Faktoren, die in dieser Arbeit behandelt werden, wie z.B. dem Industriekontext, der mobilen MRK oder GUIs. Sei es

die fehlende nutzungszentrierte Gestaltungsabsicht oder der Industriekontext, vor allem den Bezug zur Kooperation an Montagearbeitsplätzen.

Der menschenzentrierte Designprozess nach DIN EN ISO 9241-210 (Deutsches Institut für Normung eV., 2020) empfiehlt bei der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen die Anwendung von Gestaltungsprinzipien, unter anderem aus DIN EN ISO 9241-110, 112 und 13. Besonders wirtschaftlich zur Evaluierung sind Inspektionsverfahren, weil sie in kurzer Zeit durchgeführt werden können (Held & Schrepp, 2019), wie z.B. die Heuristische Evaluation nach Nielsen (Nielsen & Molich, 1990). Eine Evaluierung von ausgearbeiteten User Interfaces sollte auch mit Endnutzenden durchgeführt werden. Diese Usability Tests können mit standardisierten Fragebögen wie IsoMetrics oder ISONORM 9241/110 durchgeführt werden, wobei beide ähnlich aussagekräftig sind (Figl & Mensch, 2009). Eine Übersicht über Usability Methoden wurde in eine Taxonomie implementiert. Sie ist eingeteilt in die Klassen *Testing*, *Inspection*, *Inquiry*, *Analytical Modeling* und *Simulation* (Ivory & Hearst, 2001; Sawasdichai, 2004).

Der Prozess, mit dem das aktuelle Wireframe entwickelt wurde, besteht aus einer GDTA, einem Physical Model und einem Wireframe Design, in dem Gestaltungsprinzipien für Situationsbewusstsein implementiert wurden (siehe Studie 1). Eine Ansicht auf dem GUI stellt das Gesamtziel dar, eine stellt den Status des Roboters bezogen auf seine aktuelle Tätigkeit dar und eine zeigt die Checkliste, um die Durchführung der aktuellen Aufgabe auf seine Richtigkeit zu prüfen. Das bestehende Wireframe wurde vorab mittels qualitativer Interviews evaluiert.

4.3 Motivation und Forschungsfrage

Die Motivation dieser Arbeit liegt darin, eine Vorgehensweise zu erarbeiten, um eine gebrauchstaugliche Benutzungsschnittstelle zu gestalten, die Montagearbeitende bei einer mobilen Mensch-Roboter Kooperation unterstützen soll. Es hat sich gezeigt, dass aktuell Bedarf an nutzerzentrierten Benutzungsschnittstellen für mobile MRK besteht. Vorarbeit wurde bereits geleistet, indem ein Wireframe entwickelt wurde, das relevante Informationen definiert hat, die eine Mensch-Roboter-Kooperation für Situationsbewusstsein zum Ziel hat.

Der nächste Schritt ist das Erstellen eines interaktiven Mockups, um die GUI bzgl. Gebrauchstauglichkeit und Situationsbewusstsein evaluieren zu können. Der Wert dieser Forschung für die Wissenschaft ist, dass ein Prozess aufgezeigt wird, wie eine GUI für eine mobile MRK gestaltet werden kann, die Situationsbewusstsein und Gebrauchstauglichkeit

unterstützt. Die Möglichkeiten, Methoden für eine GUI für die mobile MRK zu wählen und kombinieren, sind vielfältig und kontextabhängig.

Es ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI für eine gebrauchstaugliche MRK gestaltet werden?

4.4 Methodik

Im Folgenden wird die experimentelle Aufgabe beschrieben und das Forschungsdesign erläutert. Das Forschungsdesign ist in Methoden zur Analyse, Gestaltung und Evaluierung einer GUI für die mobile MRK eingeteilt. Die Analysemethoden sind die quantitative Studie zur Erhebung der Eingabemodalitäten und die qualitative Befragung zu der bevorzugten Eingabemodalität. Die einzelnen Methoden beziehen sich wie folgt auf das Forschungsziel: Die quantitative Befragung untersucht, welche Eingabemodalitäten von der Zielgruppe bei der Bedienung von GUIs bevorzugt werden, da die Eingabeform einen starken Einfluss auf das GUI-Design hat. Das qualitative Interview greift die bevorzugte Eingabemodalität auf und befragt die Nutzer nach ihren Erfahrungen, da die Verwendung vertrauter Elemente zu einer höheren Nutzerakzeptanz führt. Ein interaktives Mockup ist notwendig, um das Situationsbewusstsein zu messen und die Usability zu testen. Die heuristische Evaluation führt mit Hilfe von Experten zu Verbesserungsvorschlägen für die GUI. Die quantitative Studie ermöglicht die Messung des Situationsbewusstseins und das Einholen von Feedback. Das High Fidelity Mockup fasst alle Erkenntnisse zu einem ganzheitlichen GUI-Design zusammen, so dass dieses anschließend in einem Usability-Test mit potenziellen Nutzenden getestet werden kann. Die MRK-Spezifikation des Prozesses ergibt sich vor allem aus der Relevanz der Konstrukte Situationsbewusstsein und Gebrauchstauglichkeit, da sich der Kontext auf mobile MRK und nicht auf stationäre MRK bezieht.

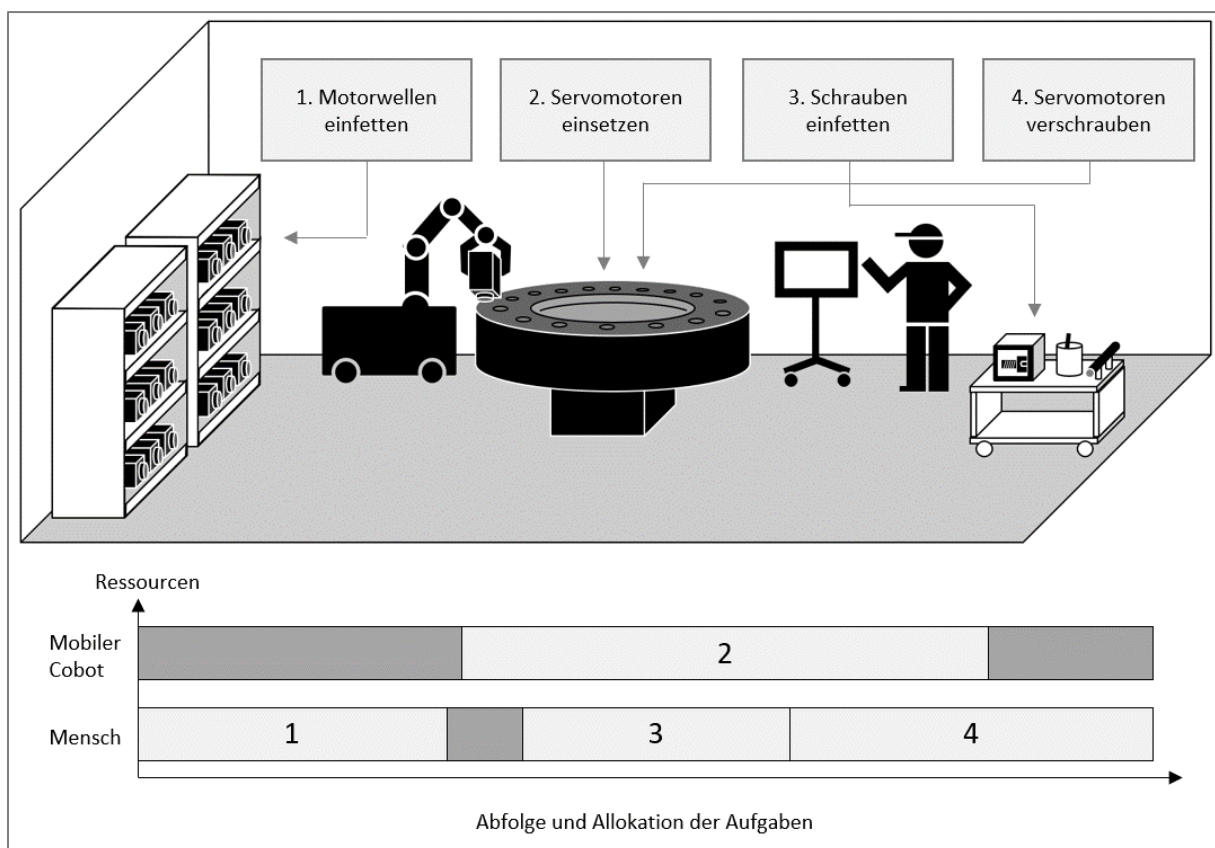
4.4.1 Experimentelle Aufgabe

Im Anwendungsfall wird ein mobiler Roboter in einer industriellen Umgebung zur Unterstützung der Montage eingesetzt, wobei Mensch und Roboter an einer gemeinsamen Arbeitsaufgabe arbeiten. Die Arbeitsaufgabe besteht nach wie vor darin, einen Behältertisch für eine Etikettiermaschine der Getränkeindustrie zu montieren. Für diese Studie wurde die komplexe Montageaufgabe von 25 auf 4 Schritte reduziert. Diese Schritte beinhalten das Fetten

von Motorwellen (Schritt 1), das Einsetzen von Servomotoren in einen Behälterertisch (Schritt 2), das Fetten von Schrauben (Schritt 3) und das Verschrauben der Servomotoren mit dem Behälterertisch (Schritt 4). Die Mensch-Roboter-Kooperation ist insofern realisiert, als sich der Mensch und der Roboter den Arbeitsraum teilen, während sie an der gemeinsamen Arbeitsaufgabe arbeiten. Die Werksperson kann den Roboter auch bei der Positionierung der Servomotoren unterstützen oder die bereits platzierten Antriebe zwischenzeitlich verschrauben. Abbildung 38 zeigt die Elemente und Ressourcen für die Arbeitsaufgabe und die Aufgabenzuweisung. Der Ablauf, wie er bei der Ausführung der Aufgabe in diesem Anwendungsfall gehandhabt wird, ist in einem Diagramm dargestellt, das auf dem Gantt-Diagramm einer Montagesequenz für die Mensch-Roboter-Kooperation basiert. (Beumelburg, 2005).

Abbildung 38

Elemente und Ressourcen für Abfolge der Arbeitsaufgaben und Aufgabenallokation



Die Arbeitsaufgabe der Behälterertischmontage wird als geeignete Anwendung für die mobile MRK bewertet. Bezogen auf die Montagelehre in der industriellen Produktion entspricht der Anwendungsfall einer stationären manuellen Montage von Großgeräten. (Lotter & Wiendahl,

2013). So entsteht ein dynamisches System, das die mobile MRK nützlich und unterstützend macht. Den einzelnen Montageschritten können die in der Montagelehre bewährten Fähigkeiten zugeordnet werden (Hammerstingl & Reinhart, 2017). Das Schmieren von Bauteilen entspricht der Fähigkeit *Schmieren*, das Einsetzen von Stellantrieben der Fähigkeit *Handhaben* und das Verschrauben von Stellantrieben der Fähigkeit *An-/Einpressen*, die in DIN 8593-3 beschrieben sind.

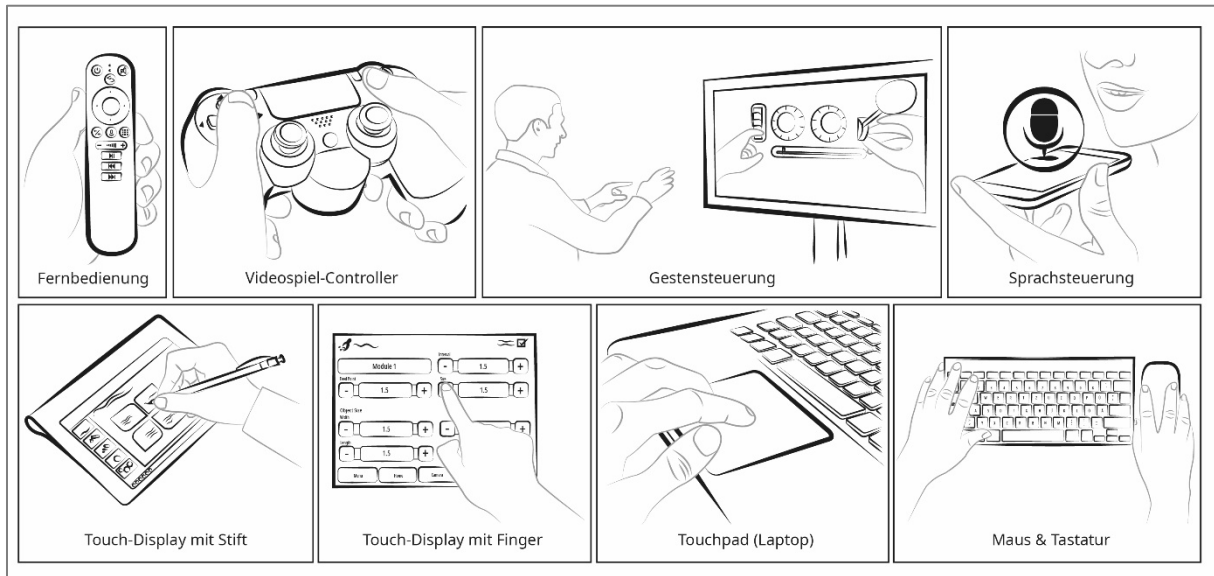
4.4.2 Methode der quantitativen Studie für Eingabemodalitäten

Die Analysephase besteht aus zwei Methoden, um Informationen über die Nutzung von Benutzungsschnittstellen und Eingabemodalitäten durch potenzielle Endnutzer zu erhalten. Die erste Analyse ist eine Umfrage über die Erfahrungen mit verschiedenen Eingabemodalitäten und die Bevorzugung bestimmter Modalitäten für die Benutzungsschnittstelle des Cobots. Abbildung 39 zeigt die Eingabemodalitäten, die in der Umfrage zur Auswahl stehen. Die beiden Fragen lauten: "Wie häufig nutzen Sie diese Eingabemodalität im Alltag?" und "Können Sie sich diese Eingabemodalität in der Mensch-Roboter-Kollaboration vorstellen?". Die Fragen wurden von den Befragten jeweils auf einer 4-Punkte-Likert-Skala bewertet. Für die Auswertung wird jedem Item eine Punktzahl zugeordnet. Bei der Frage "Wie oft nutzen Sie diese Eingabemodalität im Alltag?" stehen die Items *Fast täglich* (Wert 3), *Wöchentlich* (Wert 2), *Selten* (Wert 1) und *Nie* (Wert 0) zur Auswahl. Bei der Frage "Können Sie sich diese Form des Inputs in der Mensch-Roboter-Kollaboration vorstellen?" stehen die Items *Sehr gut* (Wert 3), *Grundsätzlich* (Wert 2), *Weniger* (Wert 1) und *Nie* (Wert 0) zur Auswahl. Die Auswertung erfolgt für beide Fragen in gleicher Weise. Für jede Antwortmöglichkeit werden die Punktzahlen addiert und anschließend der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

Von den 31 Befragten sind 27 Männer und 4 Frauen. Das Alter liegt zwischen 17 und 60 Jahren ($M=37.19$; $SD=13.35$) und die Berufserfahrung in der Fertigung zwischen 2 und 42 Jahren ($M=17.53$; $SD=12.22$). Alle Befragten arbeiten in der Montage und entsprechen somit den potenziellen Endnutzenden des Robotersystems.

Abbildung 39

Eingabemodalitäten, die bei der quantitativen Studie zur Auswahl stehen

**4.4.3 Methode der qualitativen Befragung zu Touch-Interfaces**

Die zweite Analyse besteht aus qualitativen Interviews mit Montagepersonen. Das Thema der Fragen ergibt sich aus den Präferenzen für die Eingabemodalitäten. Da Touch-Systeme in der vorangegangenen Befragung am besten abgeschnitten haben, werden sie in den qualitativen Interviews thematisiert. Die Personen werden gefragt, welche Touch-Systeme sie im Alltag verwenden. Außerdem werden sie gefragt, wie sie mit Touch-Systemen und einzelnen Apps auf Smartphones umgehen. Die Interviews werden aufgezeichnet und transkribiert. Anschließend wird eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring zur Auswertung der Interviews durchgeführt (Mayring, 2010). Die Transkripte werden paraphrasiert und kodiert. Ein Kodierleitfaden wird erstellt und die Häufigkeit der Erwähnung von Elementen (z.B. verwendete Anwendungen) angegeben. Die Kodierleitfaden enthält nummerierte Kategorien, die Definition einer Kategorie und ein Ankerbeispiel mit der Nummer des Interviews und der Seitenzahl der Textpassage. Außerdem sind die Kodierregeln angegeben, wann eine Textstelle einer Kategorie zugeordnet wird und nach welchen Kriterien die Zuordnung erfolgt. An der Befragung nehmen 11 Werkkräfte aus der Montageabteilung teil. Alle sind männlich und zwischen 26 und 50 Jahre alt ($M=40.1$; $SD=8.63$).

4.4.4 Methode der Gestaltung interaktiver Mockups

In der ersten Iteration erfolgt die Gestaltung des interaktiven Mockups unter Anwendung der Gestaltungsprinzipien aus den Teilen 110, 112 und 13 der DIN EN ISO 9241 und unter Umsetzung der Ergebnisse der Wireframe-Evaluierung aus der vorangegangenen Untersuchung (siehe Kap. 3.5.4). DIN EN ISO 9241-110 empfiehlt die 7 Gestaltungsprinzipien: *Aufgabenangemessenheit*, *Selbstbeschreibungsfähigkeit*, *Erwartungskonformität*, *Lernförderlichkeit*, *Steuerbarkeit*, *Fehlertoleranz* und *Individualisierbarkeit*. Diese Prinzipien basieren auf der Version von 2016, und obwohl die Version von 2019 eine leicht veränderte Form der Prinzipien enthält, ist die Version von 2006 konform mit dem Fragebogen ISONORM 9241/110. Die DIN EN ISO 9241-112 enthält Prinzipien für die Darstellung von Informationen, um Systeme so zu gestalten, dass sie für die Nutzung geeignet sind, sei es visuell, auditiv oder taktil (Deutsches Institut für Normung eV., 2017). Es handelt sich um die 6 Prinzipien Entdeckbarkeit, Ablenkungsfreiheit, Unterscheidbarkeit, Eindeutige Interpretierbarkeit, Kompaktheit und Konsistenz (interne und externe). Die Norm DIN EN ISO 9241-13 (Deutsches Institut für Normung eV., 1998) befasst sich mit der *Benutzerführung für die Mensch-System-Interaktion*, die in folgende Themenbereiche unterteilt ist: *Allgemeine Empfehlungen zur Benutzerführung*, *Eingabeaufforderungen*, *Rückmeldung*, *Statusinformationen*, *Fehlermanagement* und *Online-Hilfe*. In der zweiten Iteration erfolgt das Design durch die Implementierung der Ergebnisse aus der heuristischen Evaluation und der quantitativen Studie zur Messung von Situationsbewusstsein. Der intuitive Programmiermodus aus der vorherigen Arbeit wird ebenfalls implementiert, so dass ein High Fidelity Mockup entsteht.

4.4.5 Methode der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen

Die heuristische Evaluation nach Nielsen wird mit n=5 Usability-Fachkräften aus dem Maschinenbau durchgeführt. Sie alle gestalten und entwickeln in ihrer täglichen Arbeit Benutzungsschnittstellen für industrielle Anwendungen. Die Reviews mit den Personen werden als Einzelinterviews durchgeführt. Bei der heuristischen Evaluation untersuchen die Reviewenden die Benutzungsschnittstelle einzeln, um eine unabhängige und unbeeinflusste Bewertung zu gewährleisten. Die Reviewenden bewerten die GUI anhand der 10 Nielsen Heuristiken und geben zu jedem Prinzip den aktuellen Status und Verbesserungsvorschläge an.

4.4.6 Methode des Usability-Tests mit Endnutzenden

Zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit der GUI wird ein Usability-Test mit dem standardisierten Fragebogen ISONORM 9241/110 durchgeführt. Für die Evaluation wurde eine Laborumgebung gewählt, in der sowohl die Arbeitsumgebung als auch die GUI auf zwei Bildschirmen dargestellt werden, analog zur Messung des Situationsbewusstseins. An der Evaluation nahmen 20 Montagearbeitende teil, die potenzielle Endnutzende der entwickelten Schnittstelle sind. 17 Teilnehmer sind männlich und 3 weiblich, im Alter von 17 bis 54 Jahren ($M=34.75$; $SD=12.30$) und mit einer Berufserfahrung in der Montage von 1 bis 38 Jahren ($M=16.15$; $SD=10.16$). Der Usability-Test umfasst 19 Aufgaben zur Bedienung der GUI während einer hypothetischen Durchführung der Montageaufgabe. Nach Abschluss der Aufgaben füllt jeder Proband den Fragebogen ISONORM 9241/110 aus. Die Leistung der Testpersonen bei der Durchführung der Aufgaben sowie die Bewertungen im Fragebogen wurden ausgewertet.

4.5 Ergebnisse

Im vorhergehenden Kapitel wurden die Entwicklungsmethoden erläutert. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des nutzerzentrierten Designprozesses beschrieben. Die Ergebnisse der Analyse werden in quantitative und qualitative Untersuchungen unterteilt. Die Ergebnisse des Designs werden in die angewandten Teile der DIN EN ISO 9241 und die Visualisierung der Ergebnisse unterteilt. Anschließend werden die Ergebnisse der Evaluation erläutert und die Ergebnisse in einer Visualisierung der GUI dargestellt, um Zusammenhänge zwischen der GUI und den Prinzipien der DIN EN ISO 9241 zu erkennen. Die Ergebnisse der Evaluation werden in die heuristische Evaluation und einem Usability Test mit Endnutzenden unterteilt. Für die Nutzeranalyse wurde eine quantitative Befragung durchgeführt, um die Erfahrungen der Mitarbeiter mit den Eingabemodalitäten zu untersuchen und zu ermitteln, welche Eingabemodalitäten für den Anwendungsfall bevorzugt werden. Eine qualitative Befragung wurde durchgeführt, um die grundlegenden Erfahrungen mit den bevorzugten Eingabemodalitäten zu analysieren.

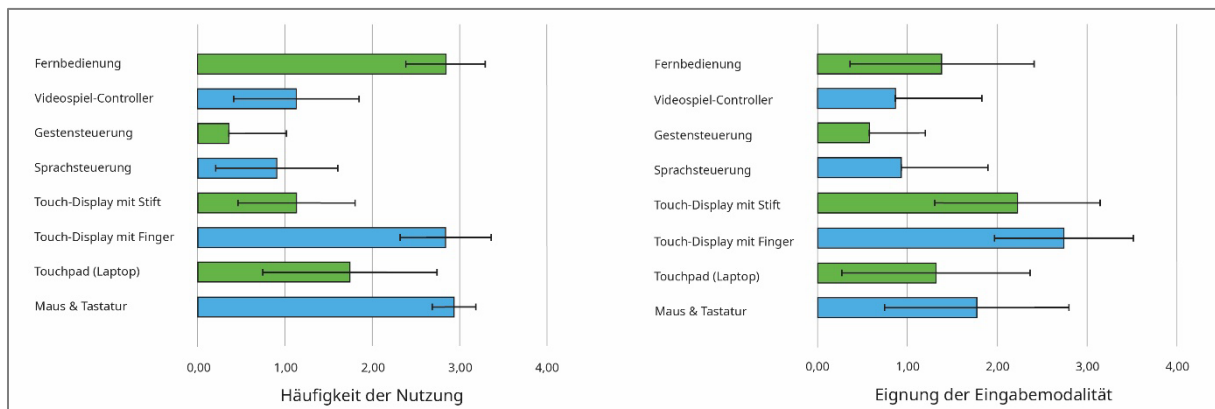
4.5.1 Ergebnis der quantitativen Studie für Eingabemodalitäten

Die Befragung zu den Eingabemodalitäten für grafische Benutzungsschnittstellen ergab recht eindeutige Ergebnisse. Die drei am häufigsten verwendeten Eingabemodalitäten sind Maus und

Tastatur, Touchscreen mit dem Finger und die Fernbedienung. Gestensteuerung wird am wenigsten verwendet. Bei der Frage nach der Eignung einer Eingabebform für die Mensch-Roboter-Interaktion am Montagearbeitsplatz tendieren die Meinungen stark zu Touchscreen mit Finger und Touchscreen mit Stift. Am wenigsten kann man sich die Eingabe über Gestensteuerung vorstellen. Ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Nutzung bestimmter Eingabebformen und der Eignung dieser Eingabebformen für die Mensch-Roboter-Interaktion am Montagearbeitsplatz ist nicht erkennbar bzw. die Faktoren korrelieren nur schwach miteinander. Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse der Befragung zu den Eingabemodalitäten.

Abbildung 40

Ergebnis der Erhebungen zu den Eingabemodalitäten



4.5.2 Ergebnis der qualitativen Befragung zu Touch-Interfaces

Die Ergebnisse der Befragungen zu Touch-Interfaces zeigen, dass die Befragten eine überschaubare Anzahl von Touch-Interfaces in ihrem Alltag nutzen. Smartphones oder Tablets sind ihnen als erstes begegnet, andere Geräte mit Touchscreens wie Navigationsgeräte im Auto, Geldautomaten oder Bestellbildschirme in Schnellrestaurants mussten sie erst kennenlernen. Auch bei der Frage nach den Apps, die auf Smartphones genutzt werden, ist die Zahl der Apps überschaubar. Jede befragte Person, der ein Smartphone besitzt, nutzt auch die Messenger-App *WhatsApp*. Die am häufigsten genutzten Apps sind das soziale Netzwerk *Facebook*, der Kartendienst *Google Maps* und das Videoportal *YouTube*. Gefragt nach der Zufriedenheit mit den verwendeten Touch-Systemen, sind die Befragten im Allgemeinen mit den genutzten Apps zufrieden. Dies gilt auch für die Bildschirme zur Essensbestellung bei *McDonald's*. Eher unzufrieden sind sie mit der Benutzerführung von Navigationsgeräten. Tabelle 2 zeigt den

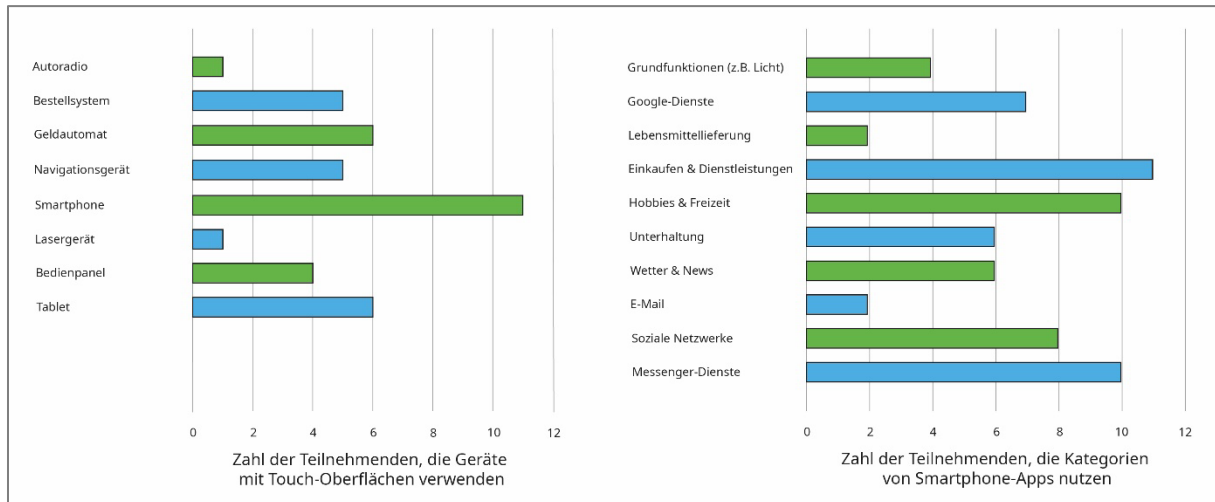
Kodierleitfaden für die qualitative Befragung, unterteilt nach Kategorie, Definition und Ankerbeispiel.

Tabelle 2

Kodierleitfaden für die qualitative Befragung von Werkskräften zu Touch-Systemen

Name	Definition	Ankerbeispiel
1.1 Genutzte Geräte mit Touchdisplay zu Hause	Nennung von zuhause genutzten Geräten mit Touchdisplay	Ich benutze hauptsächlich mein Smartphone zu Hause
1.2 Genutzte Geräte mit Touchdisplay Arbeit	Nennung von genutzten Geräten mit Touchdisplay Arbeit	Bei der Arbeit nutze ich ein Bedienpanel mit Touchdisplay
1.3 Genutzte Geräte mit Touchdisplay unterwegs	Nennung von unterwegs genutzten Geräten mit Touchdisplay	Im Auto habe ich ein Navi mit Touchdisplay
2 Genutzte Applikationen auf Touchgeräten	Nennung von genutzten Anwendungen	Ich nutze WhatsApp
3 Probleme von Touchdisplays	Nennung von Problemen in Nutzung	Die Bedienpanels hängen zu weit hoch
4 Verbesserungsvorschläge für Touchdisplays	Verbesserungsvorschläge zur Erleichterung Nutzung	Die Displays sollten besser kalibriert sein.

Abbildung 41 zeigt das Ergebnis der qualitativen Befragung zu Touch-Systemen auf der linken Seite, welche Apps in den Interviews genannt wurden und wie viele der Befragten diese nutzen. Die rechte Seite zeigt, welche Kategorien von Apps am häufigsten auf dem Smartphone genutzt werden.

Abbildung 41*Ergebnis der qualitativen Befragung zu Touch-Systemen***4.5.3 Ergebnis der Gestaltung des interaktiven Mockups**

Auf die Analysephase folgt die Entwurfsphase, in der die Normen ISO 9241-110, 112 und 13 für die Gestaltung der grafischen Bedienoberfläche angewandt wurden. Die Prinzipien wurden systematisch angewendet, indem nach Anwendungsmöglichkeiten gesucht wurde, die sich als konsistent erwiesen. Zur Veranschaulichung der Systematik wurden die Prinzipien in eine Tabelle eingetragen und die Anwendung des jeweiligen Prinzips in der GUI sowie eine Kodierung vorgenommen, um die Anwendung in der GUI später nachvollziehen zu können. Die Codierung der Prinzipien besteht aus dem Teil der Norm (z.B. 110), einem Kürzel für das speziell für diese Anwendung geschaffene Prinzip (z.B. Ta = Eignung für die Aufgabe) und einer fortlaufenden Nummerierung, die für jedes Prinzip neu beginnt. Erkenntnisse aus der qualitativen Bewertung in der Analysephase wurden ebenfalls in der GUI umgesetzt. Dazu gehörte z.B. das Weglassen des Werkstoffes bei der Bauteilbeschreibung und das Hinzufügen der Angabe, ob Verbindungselemente geschmiert werden müssen.

Die Gestaltungsprinzipien werden auf die Benutzungsschnittstelle des mobilen kollaborierenden Roboters angewendet, um eine brauchbare Mensch-Roboter-Interaktion zu schaffen. Das Prinzip der Aufgabenangemessenheit wurde angewandt, indem die Schaltfläche mit dem Roboter unsichtbar gemacht wurde, wenn die Roboterunterstützung für die jeweilige Aufgabe nicht verfügbar ist. Ebenso werden Informationen über das Bauteil nur auf Anfrage angezeigt. Die Zeit- und Aufgabenanzeige zeigt die verbleibende Zeit und die Anzahl der verbleibenden Aufgaben an, so dass diese nicht von der Werksperson berechnet werden müssen. Bei der Nummerierung der Aufgaben wurde das Prinzip der

Selbstbeschreibungsfähigkeit umgesetzt, z.B. ist die aktuelle Aufgabe in der Aufgabenleiste immer blau hinterlegt und in jedem Modus sichtbar. Abgeschlossene Aufgaben sollen durch eine schwarze Einfärbung schnell erkennbar sein. Die Farbe Rot wurde für Markierungen zur Benutzerführung verwendet, wie z.B. die zu schmierende Motorwelle. Die Übereinstimmung mit den Erwartungen der Nutzer wurde z.B. durch die Verwendung von vertrautem Vokabular in der Checkliste erreicht. Gleiches gilt für allgemein akzeptierte Konventionen wie den Play-Button und die Vor- und Zurück-Buttons, die aus Videoplayern und Mediengalerien bekannt sind. Die interne Konsistenz der Informationsdarstellung wird durch Elemente umgesetzt, die sich immer an der gleichen Stelle befinden. Das Prinzip der Lernförderlichkeit findet sich darin wieder, dass der Button oben links für weitere Anweisungen gedrückt werden kann, aber nicht muss.

Im Testfenster erhält die nutzende Person Erklärungen, mit denen ihn das System durch die Anwendung führt. Das System ermöglicht es Benutzenden auch, Dialogschritte zu wiederholen, indem Schaltflächen in der Checkliste ausgewählt werden können. Beim Prinzip der Kontrollierbarkeit kontrollieren Benutzende z. B. die Art und Weise, wie ein Dialog fortgesetzt wird, da ein Wechsel zwischen den Aufgaben jederzeit möglich ist. Ebenso kontrolliert die nutzende Person die Geschwindigkeit, indem er den Roboter anhalten und neu starten kann. Der letzte Dialogschritt kann durch Öffnen und Schließen des Fensters rückgängig gemacht werden, z.B. um ein Testprotokoll zu bestätigen. Ebenso werden Nutzende durch einen Hinweis unterstützt, den sie im Falle einer fehlerhaften Aktion in der Checkliste erhalten. Auch das Aktivieren einer Bestätigung in der Checkliste kann die Aktion rückgängig machen, wenn sie nicht beabsichtigt war. Das Prinzip der Individualisierbarkeit wird z.B. dadurch umgesetzt, dass die nutzende Person den Hinweis in der linken oberen Ecke auswählen kann, aber nicht muss. Ebenso besteht die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Dialogtechniken zu wählen, indem die nächste Schaltfläche oder direkt die Aufgabe gewählt werden kann. Tabelle 3 zeigt, wie die Anwendung der Gestaltungsprinzipien nach ISO 9241-110 kodiert und verwendet wurde.

Tabelle 3

Gestaltungsprinzipien der ISO 9241-110 bezogen auf die GUI

Prinzip	Anwendung	Kodierung
Aufgabenangemessenheit (<i>Suitability for the task</i>)	Roboter Button nicht sichtbar, wenn Roboter nicht zur Verfügung steht	110-Ta-1
	Informationen über Bauteil nur auf Wunsch	110-Ta-2
	Übrige Zeit und Zahl der Aufgaben wird angezeigt	110-Ta-3

Selbstbeschreibungsfähigkeit (<i>Self-descriptiveness</i>)	Aktuelle Aufgabe ist blau markiert in der Aufgabenleiste und immer sichtbar	110-Se-1
	Erledigte Aufgaben sind schwarz gefärbt	110-Se-2
	Nutzende werden durch rote Markierungen geleitet	110-Se-3
Erwartungskonformität (<i>Conformity with user expectations</i>)	Vertrautes Vokabular in Checkliste (z.B. Schmierstoff, Dosierung etc.)	110-Ex-1
	Allgemein anerkannte Konventionen durch Play-Button wie bei Video Player und Vor- und Zurück Buttons wie in Mediengalerien	110-Ex-2
	Interne Konsistenz der Informationsdarstellung durch Elemente, die immer an der gleichen Stelle sind, z.B. Servomotor	110-Ex-3
Lernförderlichkeit (<i>Suitability for learning</i>)	System lehrt Benutzende, da Button links oben gedrückt werden kann oder nicht	110-Le-1
	System führt durch die Anwendung, durch Erklärung bei Prüffenster	110-Le-2
	System erlaubt Benutzenden, Dialogschritte neu auszuprobieren durch Abwählen von Checkliste Buttons	110-Le-3
Kontrollierbarkeit (<i>Controllability</i>)	Benutzende steuern, wie Dialog fortgesetzt wird, da Wechseln zwischen Aufgaben immer möglich	110-Co-1
	Benutzende steuern Geschwindigkeit durch Pausieren des Roboters	110-Co-2
	Fenster kann geschlossen und wieder geöffnet werden	110-Co-3
Fehlertoleranz (<i>Error tolerance</i>)	System bewahrt Benutzende vor Fehlern, da inaktive Elemente nicht gedrückt werden können, z.B. Play/Pause Button	110-Er-1
	Fehlermanagement durch Hinweis bei falscher Aktion in Checkliste	110-Er-2
	Aktivieren kann rückgängig gemacht werden bei Bestätigung der Prüfung in Checkliste; Fehlerkorrektur	110-Er-3
Individualisierbarkeit (<i>Suitability for individualization</i>)	Möglichkeit, Niveau auszuwählen durch Hinweis, der angesehen werden kann, aber nicht muss	110-In-1
	Möglichkeit, zwischen verschiedenen Dialogtechniken zu wählen, indem Weiter-Button geklickt werden kann oder direkt die Aufgabe angeklickt werden kann	110-In-2

Die sechs Gestaltungsprinzipien für die Informationsdarstellung wurden in der Gestaltung wie folgt umgesetzt. Das Prinzip der Ablenkbarkeit wurde durch rote Markierungen bei Komponenten, eine blaue Umrandung bei der aktuell sichtbaren Aufgabe auf dem Bildschirm, durch Blinken des nächsten Buttons und durch die Bereitstellung von Informationen, welche Aktionen möglich sind, umgesetzt. Das Prinzip der Ablenkungsfreiheit wurde im Design durch die Gruppierung der Listenelemente umgesetzt. Ebenso durch die Checkliste mit roten und grünen Buttons, zur besseren Unterscheidung. Die Anzeige mit den verbleibenden Aufgaben und der Zeit wurde mit runden und eckigen Buttons umgesetzt. Die eindeutige Interpretierbarkeit der Checkliste wurde durch die Verwendung von bekanntem Vokabular für den Text umgesetzt. Auch die übersichtliche Darstellung der Teile wurde verbessert, indem

eine dreidimensionale Ansicht verwendet wurde. Prägnanz wurde durch eine einfache Darstellung ohne unnötige Farben, durch mögliche Aktionen und durch eine kompakte alternative Möglichkeit, Aufgaben direkt anzuklicken, erreicht. Das Prinzip der internen und externen Konsistenz wurde durch bekannte Elemente, wie die Pause-Taste und die Vor- und Zurück-Taste als externe Konsistenz, aber auch durch die konsistente Anordnung der Schaltflächen als interne Konsistenz umgesetzt. Tabelle 4 zeigt, wie die Anwendung der Gestaltungsprinzipien nach ISO 9241-112 kodiert und genutzt wurde.

Tabelle 4

Gestaltungsprinzipien der ISO 9241-112 bezogen auf die GUI

Prinzip	Anwendung	Kodierung
Entdeckbarkeit (<i>Detectability</i>)	Rote Markierungen für Komponenten	112-De-1
	Blaue Umrandung der aktuellen Aufgabe	112-De-2
	Blinken der nächsten Schaltfläche	112-De-3
Ablenkungsfreiheit (<i>Freedom from distraction</i>)	Aufgabenbezogene Informationen heben sich vom Hintergrund ab	112-Fr-1
Unterscheidbarkeit (<i>Discriminability</i>)	Strukturierung der Informationen durch Gruppierung der Listenelemente	112-Di-1
	Checkliste mit roten und grünen Schaltflächen zur besseren Unterscheidung	112-Di-2
	Runde und eckige Form der Buttons bei der Anzeige von verbleibenden Aufgaben und Zeit	112-Di-3
Eindeutige Interpretierbarkeit (<i>Unambiguous interpretability</i>)	Bekanntes Vokabular in der Checkliste	112-Un-1
	Übersichtliche Darstellung der Elemente durch 3-dimensionale Ansicht	112-Un-2
Kompaktheit (<i>Conciseness</i>)	Einfache Darstellung ohne überflüssige Farben	112-Conc-1
	Mögliche Aktionen	112-Conc-2
	Kompakte Alternative durch die Möglichkeit, Aufgaben direkt anzuklicken	112-Conc-3
Konsistenz, interne und externe (<i>Consistency, internal and external</i>)	Bekannte Elemente Pause-Button und Vor- und Zurück-Button als äußere Konsistenz	112-Cons-1
	Position und Anordnung der verschiedenen Gruppen immer gleich als innere Konsistenz	112-Cons-2

Die Empfehlungen zur Benutzerführung wurden anhand verschiedener Beispiele in der Oberfläche umgesetzt. Gemeinsame Orientierungsempfehlungen finden sich z.B. im Verschwinden des Checklistenfensters nach Anklicken des OK-Buttons. Ebenso durch die

Verwendung einer vertrauten Sprache und eines vertrauten Vokabulars. Eingabeaufforderungen wurden in der Form implementiert, dass die Schaltfläche Weiter nach Abschluss einer Aufgabe blinkt, um zur Eingabe aufzufordern. Die Checkliste ist eine spezifische Eingabeaufforderung, da es nur eine begrenzte Anzahl von Eingabemöglichkeiten gibt, nämlich Bestätigen und Nicht-Bestätigen. Das Bestätigen-Feedback wird durch das Öffnen des Roboterfensters unmittelbar nach dem Anklicken unterstützt. Ebenso wird die Schaltfläche Pause nach dem Anklicken zur Schaltfläche Abspielen. Die Aufgabenseite und die Schaltfläche ändern sich nach dem Anklicken. Die Empfehlung mit Statusinformationen wird durch die Anzeige des Aufgabenfortschritts in der Aufgabenleiste, die Anzeige der Anzahl der verbleibenden Aufgaben und der verbleibenden Zeit sowie die Anzeige des Roboterfortschritts in der Roboteransicht umgesetzt. Das Empfehlungsfehlermanagement wurde durch die Anzeige eines Hinweises, was zu tun ist, wenn die Schaltfläche "Nicht bestätigen" angeklickt wird, implementiert. Ebenso kann die nutzende Person durch Rückgängigmachen oder Abwählen der Bestätigungsschaltfläche in der Checkliste Fehler behandeln. Eine Online-Hilfe ist in der Checkliste in Form eines Hinweises vorhanden, der bei der Erledigung der Aufgabe hilft. Tabelle 5 zeigt, wie die Anwendung der Gestaltungsprinzipien nach ISO 9241-13 kodiert und verwendet wurde.

Tabelle 5

Gestaltungsprinzipien der ISO 9241-13 bezogen auf die GUI

Prinzip	Anwendung	Kodierung
Allgemeine Empfehlungen zur Benutzerführung (<i>Common guidance recommendations</i>)	Fenster kann bei Bedarf geschlossen und wieder geöffnet werden.	13-Co-1
	Begriffe wie Schmierstoff und Dosierung werden typischerweise von Arbeitern verwendet.	13-Co-2
Eingabeaufforderungen (<i>Prompts</i>)	Blinkende Schaltfläche anklicken, als explizite Eingabe	13-Pr-1
	Spezifische Eingabeaufforderung, als begrenzte Anzahl von Eingabemöglichkeiten	13-Pr-2
Rückmeldung (<i>Feedback</i>)	Fenster öffnet sich nach Anklicken	13-Fe-1
	Pause-Button wird nach Klick zum Play-Button	13-Fe-2
	Aufgabenseite und Schaltfläche ändern sich nach Anklicken	13-Fe-3
Statusinformation (<i>Status information</i>)	Fortschritt der Aufgaben	13-St-1
	Anzahl der Aufgaben und verbleibende Zeit	13-St-2
	Fortschritt des Roboters	13-St-3

Fehlermanagement (<i>Error management</i>)	Hinweis erscheint, wenn das Kontrollkästchen angeklickt wird	13-Er-1
	Fehlerbehandlung durch Benutzende, Klick kann rückgängig gemacht werden	13-Er-2
Online-Hilfe (<i>On-line help</i>)	Hinweis erscheint in der Checkliste	13-On-1

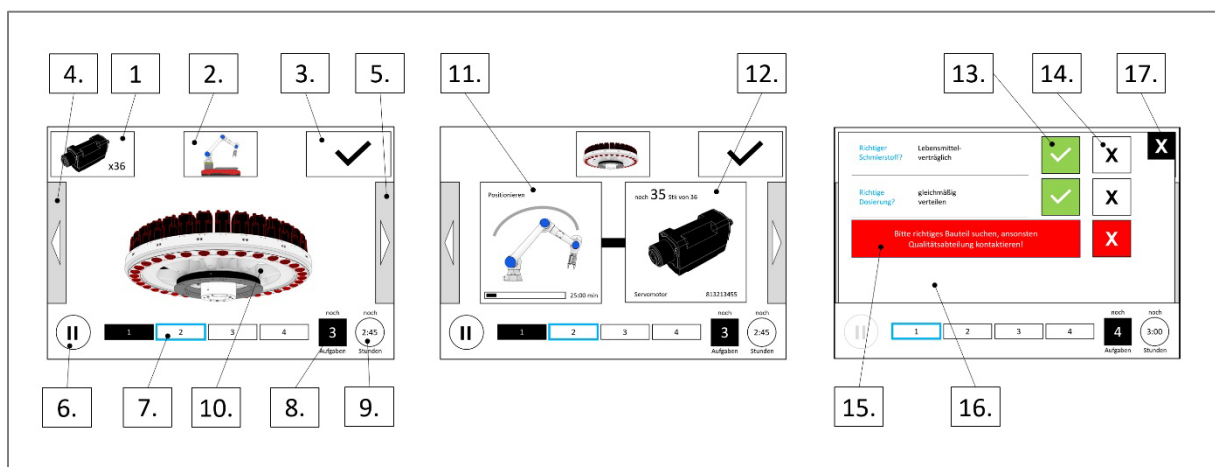
Das Design des interaktiven Modells ist in Abbildung 42 dargestellt. Die Definition der einzelnen Begriffe der grafischen Bedienoberfläche wird im Folgenden beschrieben:

1. Die Schaltfläche *Ressource* ist sichtbar, wenn die Gesamtansicht des Ziels angezeigt wird, und wird ausgewählt, um Details über die Ausführung der Aufgabe zu erhalten.
2. Die Schaltfläche *Roboter* wechselt von der Gesamtansicht des Ziels zur Roboteransicht und wird zur Schaltfläche Gesamtziel, um zur Gesamtansicht des Ziels zurückzukehren.
3. Die Schaltfläche *Checkliste* ist sowohl in der Gesamtzielansicht als auch in der Roboteransicht sichtbar und ruft die Checkliste auf.
4. Die Schaltfläche *Zurück* führt zur vorherigen Aufgabe und ist nicht verfügbar, wenn Sie sich in der ersten Aufgabe befinden.
5. Die Schaltfläche *Weiter* führt zur nächsten Aufgabe und ist nicht verfügbar, wenn Sie sich in der letzten Aufgabe befinden.
6. Die Schaltfläche *Pause* hält den Roboter an und kann aktiviert werden, wenn der Roboter seine Aufgabe begonnen hat. Sobald sie gedrückt wird, hält der Roboter an und der *Pause-Button* wird zum *Play-Button*. Wenn der *Play-Button* gedrückt wird, startet der Roboter erneut und der *Pause-Button* wird aktiviert.
7. Die *Aufgabenleiste* mit den *Aufgabenbuttons*; die *Aufgabenbuttons* rufen beim Anklicken die jeweilige Aufgabenseite auf; die Ansicht kann jederzeit zwischen den Aufgaben gewechselt werden.
8. Die *Aufgabenanzeige* zeigt die verbleibende Anzahl der Aufgaben an.
9. Die *Zeitanzeige* zeigt die verbleibende Zeit bis zum Abschluss der Aufgabe an.
10. Die *Baugruppenanzeige* ist in der Gesamtzielansicht sichtbar und zeigt die aktuelle Baugruppe, die fertig gestellt werden muss.
11. das *Roboterstatusfenster* zeigt an, welche Aufgabe der Roboter gerade ausführt und wie weit er dabei gekommen ist.

12. Das *Ausrüstungsstatusfenster* zeigt an, welche Ausrüstung der Roboter gerade montiert und wie viele Elemente noch zu montieren sind. Die Ausrüstung wird auch grafisch mit ihrer Teilenummer dargestellt.
13. Der *Bestätigen-Button* bestätigt, dass eine Aufgabe korrekt ausgeführt wurde. Wenn sie erneut angeklickt wird, wird die Schaltfläche wieder inaktiv.
14. Der *Nicht-Bestätigen-Button* sollte angeklickt werden, wenn eine Spezifikation einer Aufgabe nicht korrekt ausgeführt wurde. Wenn sie erneut angeklickt wird, wird die Schaltfläche wieder inaktiv.
15. Sobald der *Nicht-Bestätigen-Button* angeklickt wird, erscheint der Meldungstext der Checkliste. Wird die Schaltfläche erneut angeklickt, verschwindet der Text wieder.
16. Die *Checkliste* ist ein Dialogfenster, das erscheint, wenn der *Checkliste-Button* angeklickt wird. Hier muss die Erfüllung der Aufgabe bestätigt werden, um die Aufgabe abzuschließen.
17. Die Schaltfläche *Fenster schließen* schließt die Checkliste, wenn sie angeklickt wird.

Abbildung 42

Bedien- und Anzeigeelemente der GUI

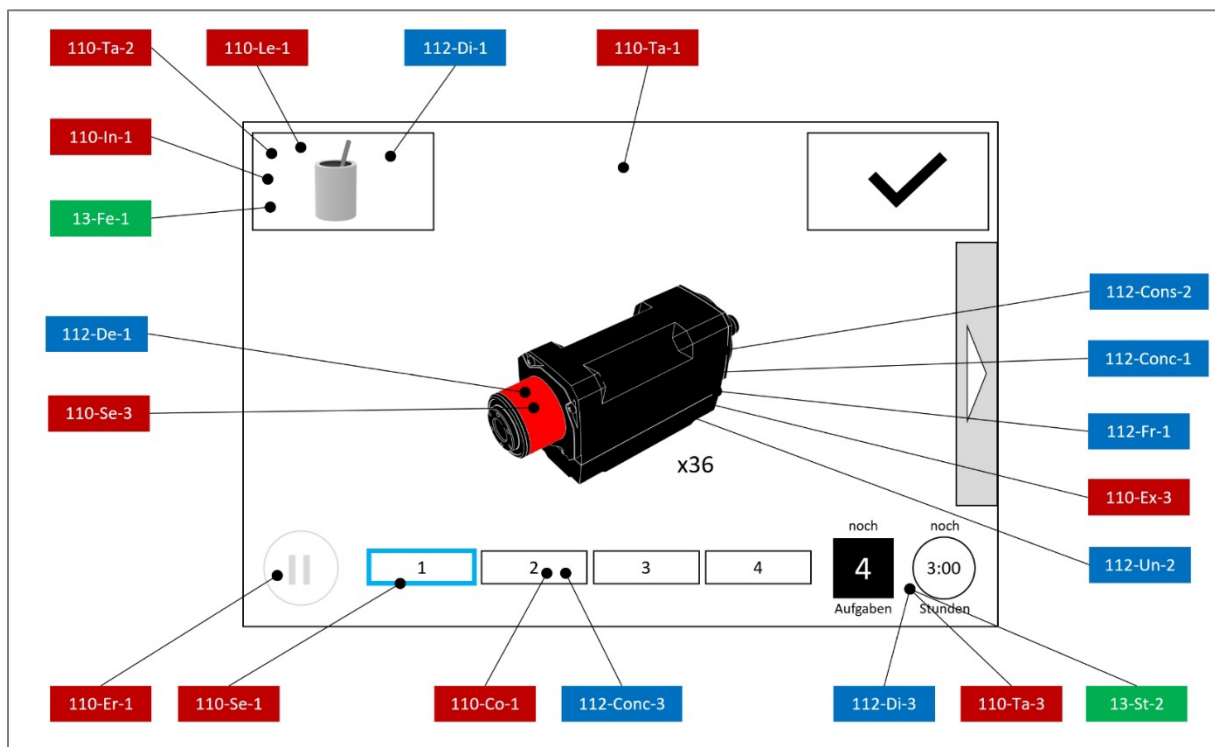


Die verwendeten Prinzipien aus den drei Teilen der DIN EN ISO 9241 werden im Mockup der GUI dargestellt. Hier werden Anwendungsfälle, aber auch Überschneidungen oder Wiederholungen der Prinzipien sichtbar. Die einzelnen Teile der DIN EN ISO 9241 wurden in drei Farben eingefärbt, um sie leicht unterscheiden zu können. DIN EN ISO 9241-110 wurde rot, 9241-112 blau und 9241-13 grün eingefärbt. Abbildung 43 zeigt das Gesamtziel der Arbeitsaufgabe, bei der die Montage sichtbar ist. Es wurde bereits erwähnt, dass die GUI eine Darstellung des Gesamtziels, d.h. des Ergebnisses, der erforderlichen Komponente und eine Statusleiste mit einer Übersicht über die Anzahl der Aufgaben und die Zeit benötigt. Die

erforderliche Komponente wird durch die Schaltfläche in der oberen linken Ecke der GUI angezeigt. Auf Knopfdruck können zusätzliche Informationen zur Unterstützung der Aufgabenbearbeitung angezeigt werden. Nach dem Prinzip der Aufgabenangemessenheit ist die Anzeige optional, da ein erfahrener Mitarbeiter diese Informationen nicht benötigt. Das gleiche Gestaltungsergebnis ergibt sich, wenn sowohl das Prinzip der Lernfähigkeit als auch das Prinzip der Individualisierbarkeit angewendet wird. Die blaue Markierung der aktuellen Aufgabe resultiert aus der Anwendung des Prinzips der Selbstbeschreibungsfähigkeit. Das gleiche Ergebnis wird durch die Anwendung des Prinzips Feedback erzielt. Bei Anwendung des Prinzips der Kontrollierbarkeit ergibt sich die Anzeige einer Aufgabe durch Anklicken der nummerierten Schaltfläche der jeweiligen Aufgabe. Das gleiche Ergebnis wird durch die Anwendung des Prinzips der Prägnanz erzielt. Dabei wird die Zuordnung zum Gesamtziel der Benutzungsschnittstelle berücksichtigt. Als Beispiel wurden drei Gestaltungsprinzipien der ISO 9241-110 auf die Ressourcentaste angewendet. Das Ergebnis ist eine Schaltfläche, die zuerst ausgewählt werden sollte, um detailliertere Informationen über die aktuelle Aufgabe zu erhalten.

Abbildung 43

Gesamtziel der Montageeinheit

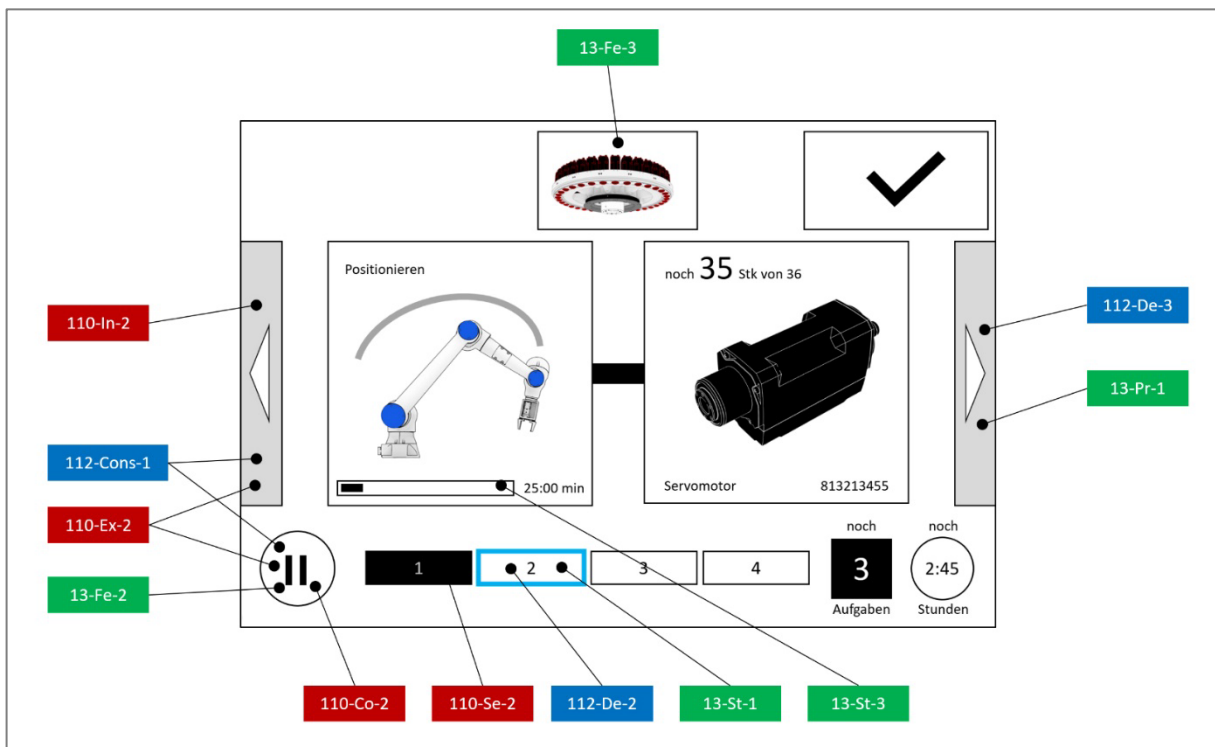


Die Abbildung der Roboteraktivität in der grafischen Bedienoberfläche wird berücksichtigt. Mehrere Gestaltungsempfehlungen beziehen sich auf Elemente wie z.B. die Zurück- und

Weiter-Schaltflächen. Anpassbarkeit gibt die Freiheit, die Aufgabe zu wählen. Wiedererkennbarkeit macht das Design leicht erkennbar. Aufforderungen führen zu einem Blinken, um das Anklicken der nächsten Aufgabe zu fördern. Prägnanz empfiehlt eine einfache Präsentation. Konformität mit Nutzungserwartungen empfiehlt ein vertrautes Design, z.B. wie bei Mediengalerien. Abbildung 43 zeigt den Status des Roboters in Bezug auf seine aktuelle Aktivität.

Abbildung 44

Status des Roboters in Bezug auf seine aktuelle Tätigkeit



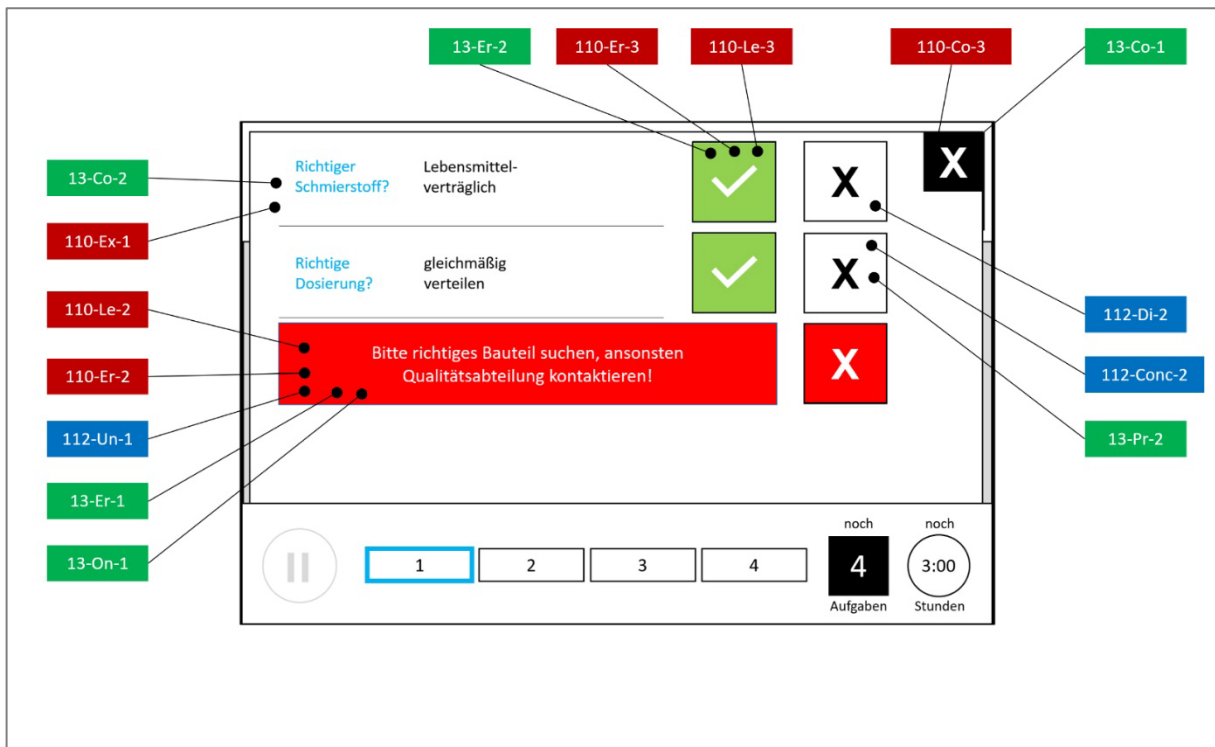
Die Abbildung der Checkliste wird berücksichtigt (siehe Abbildung 45). Die Botschaft der Checkliste enthält mehrere Gestaltungsprinzipien. Das Prinzip der Lernfähigkeit führt zu der Lösung, dass das System durch Erläuterungen in der Checkliste durch die Anwendung führt. Dies kann auch als Fehlertoleranz angesehen werden, da im Falle einer falschen Aktion Hinweise angezeigt werden. Auch die Empfehlung des Fehlermanagements wird umgesetzt, da bei Nichterfüllung der Aufgabe Unterstützung angeboten wird. Eindeutige Interpretierbarkeit wird durch die Verwendung von bekanntem Vokabular erreicht. Es ist zu erkennen, dass es bei der Gestaltung des Hinweistextes einige Redundanzen in Bezug auf die Anwendung von Gestaltungsprinzipien gibt.

Es ist zu erkennen, dass sich mehrere Gestaltungsempfehlungen auf dasselbe Element beziehen können. Dennoch hat jede Empfehlung einen unterschiedlichen Einfluss auf das Element. So

werden z.B. die Formgebung, die Farbgebung, die Wortwahl oder die Animation (z.B. Blinken) beeinflusst. Obwohl es Redundanzen in der Anwendung der Empfehlungen auf einzelne Elemente gibt (z.B. Fehlertoleranz und Fehlermanagement), gibt es keine Hinweise darauf, welche Empfehlungen besonders relevant und welche redundant sind.

Abbildung 45

Checkliste zur Überprüfung der korrekten Ausführung für die aktuelle Aufgabe



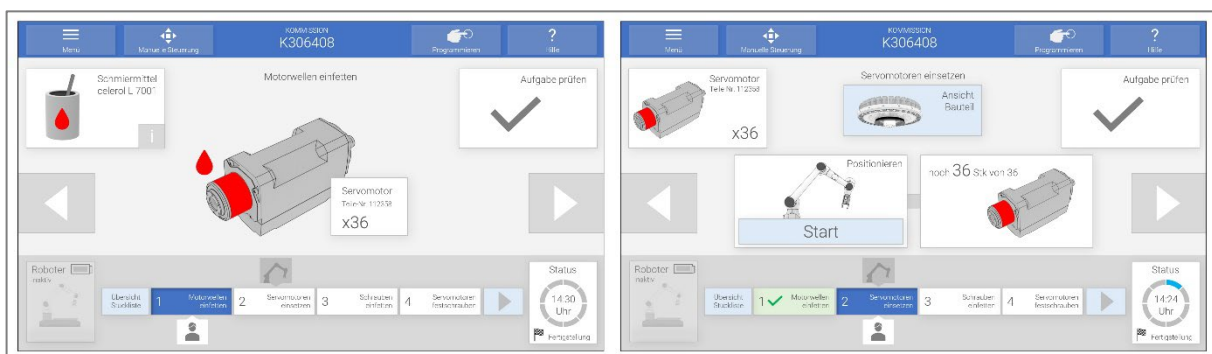
4.5.4 Ergebnis der Gestaltung des High Fidelity Mockups

In der zweiten Iteration wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Phasen umgesetzt. Dazu gehören die Empfehlungen aus der heuristischen Bewertung und die Situationsbewusstseinsmessungen. Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes bei der Gestaltung der Benutzungsschnittstelle wurde die intuitive Roboterprogrammierung, die in einer anderen Studie entwickelt und evaluiert wurde, in das Design integriert. Bei den Messungen zur Situationswahrnehmung wurde auch das Feedback in Form von Kommentaren der Probanden in die GUI implementiert. Hier einige Beispiele: Sowohl in der heuristischen Bewertung als auch im Feedback zur Situationswahrnehmungsmessung wurde empfohlen, den Namen des Schmiermittels hinzuzufügen. Bei der Messung des Situationsbewusstseins wurde z.B. die Dosierung des Schmierstoffes besser dargestellt. Dies wurde gelöst, indem ein kurzes

Anleitungsvideo hinzugefügt wurde, das in der Schnittstelle abgespielt werden kann. Auch der Wunsch nach Textbeschreibungen zu den Bildern wurde von den Testpersonen als Feedback genannt. Die Schaltflächen wurden durch die Verwendung von Kontrasten und Schatten besser sichtbar gemacht. Einfache Änderungen, die von einigen Mitarbeitern vorgeschlagen wurden und sinnvoll erschienen, wurden in das Design implementiert, wie z.B. ein roter Tropfen, um Schmiermittel deutlich zu kennzeichnen. Auch bei der heuristischen Bewertung wurde ein Vorschlag von einer Person gemacht. Die aktuelle Aufgabe von Mensch und Roboter wurde übersichtlicher dargestellt und der Status des Roboters jederzeit sichtbar gemacht. Eine zusätzliche Funktion, die ebenfalls in der heuristischen Bewertung vorgeschlagen wurde, ist die manuelle Steuerung des Roboters. Sie schaltet in einen Modus, in dem der Roboter per Teleoperation gesteuert werden kann. Abbildung 46 zeigt beispielhaft zwei Ansichten der GUI.

Abbildung 46

Zweite Iteration des GUI-Designs - die linke Ansicht zeigt die Schmierung der Servomotoren, die rechte Ansicht zeigt die Unterstützung des Roboters beim Einsetzen der Servomotoren

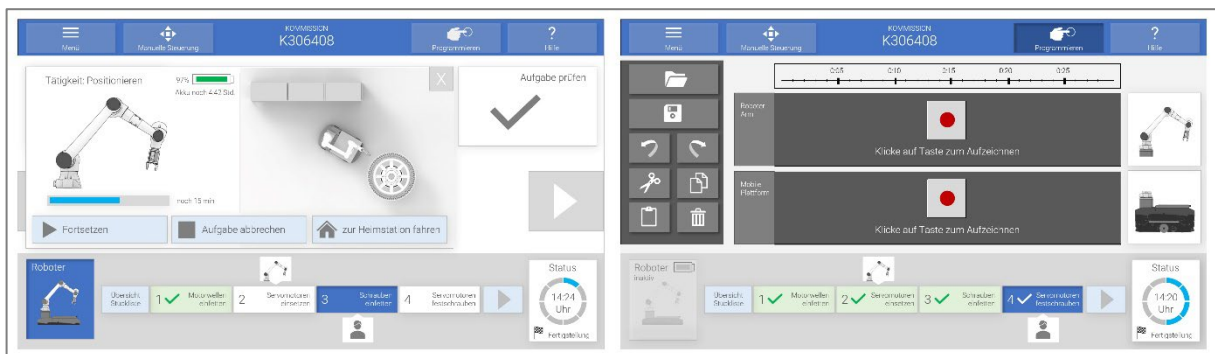


Durch die Implementierung der gewünschten Funktionen ist die Schnittstelle gleichzeitig optisch komplexer geworden. Dies machte es notwendig, sie in drei Abschnitte zu gliedern. Diese drei Bereiche wurden zur besseren Unterscheidung farblich gekennzeichnet. Der obere Bereich ist die Menüleiste, die blau eingefärbt ist. Sie enthält die Haupttasten Menü, manuelle Steuerung, aktuelle Auftragsnummer, Programmiermodus und die Hilfetaste. Der mittlere Bereich ist hellgrau gefärbt und enthält im Wesentlichen die gleichen Elemente wie in Version 1. Einige Informationen wurden hinzugefügt, z. B. Textinformationen, weshalb sich die Schaltflächen selbst durch eine weiße Einfärbung vom hellgrauen Hintergrund abheben. Der untere Bereich ist mittelgrau eingefärbt und enthält Informationen über den Roboter (Batteriestand und Aktivität), Informationen über die Arbeitsaufgabe (erledigte Aufgaben und aktuelle Aufgabenzuweisung) und den Status des Gesamtziels (Anzahl der erledigten und nicht

erledigten Aufgaben, erwartete Fertigstellung der Aufgaben). Zur Markierung wurden, wie in der Heuristischen Evaluation empfohlen, Farben noch deutlicher eingesetzt. So wurde ein hoher Batteriestand des Roboters mit einem grünen Balken markiert und eine erledigte Aufgabe im unteren Bereich grün eingefärbt. Statuselemente, die grundsätzlich leicht zu erkennen sein sollten, wurden dunkelblau eingefärbt. Zum Beispiel der aktive Roboterstatus und die aktive Arbeitsaufgabe im unteren Bereich. Wichtige Informationen zur aktuellen Aufgabe sind rot eingefärbt, z.B. die zu fettende Fläche. Der Programmiermodus ist fast identisch ausgeführt wie in der früheren Forschung zum nutzerzentrierten Design für intuitive Roboterprogrammierung. Lediglich das Menü wurde auf der linken Seite statt oben platziert, da sich oben bereits eine Menüleiste befindet. Grundsätzlich wurden im High Fidelity Mockup auf jeder Schaltfläche mehrere Informationen gespeichert, um bei Bedarf Details abrufen zu können, z. B. über den Roboterstatus, den Aufgabenstatus und die einzufügenden Komponenten. Abbildung 47 zeigt eine Detailansicht des Roboterstatus und einen Blick auf den Roboterprogrammiermodus.

Abbildung 47

Zweite Iteration des GUI-Designs - die linke Ansicht zeigt den Roboterstatus, die rechte Ansicht zeigt den Programmiermodus



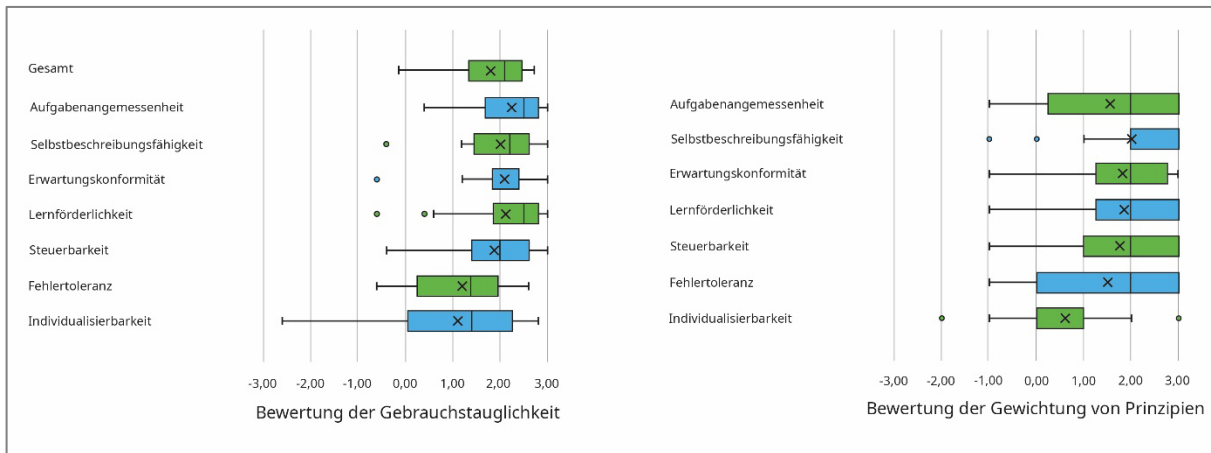
4.5.5 Ergebnis der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen

Die heuristische Evaluierung ergab insgesamt 40 verschiedene Verbesserungsvorschläge. Ein Vorschlag wurde von drei Experten unabhängig voneinander genannt. Nämlich, dass zu Beginn eine Dokumentation oder ein Tutorial angezeigt werden sollte, um Bedienende in die GUI einzuführen. Sieben Vorschläge wurden von zwei Experten unabhängig voneinander gemacht. Dazu gehörte das „Inaktiv setzen“ von Aufgaben, wenn diese noch nicht bearbeitet werden können. Oder das Hinzufügen des Hinweises "Aktiviere Roboter", das Vermeiden von Dialogboxen und das Bereitstellen von Platz für Fehlermeldungen. 32 Vorschläge wurden von

jeweils nur einer Person gemacht. Dazu gehören die Angabe der Materialnummer des Schmiermittels, mehr Informationen in der Mitte des Bildschirms, die mit dem Teil in Verbindung stehen, oder eine bessere Hervorhebung des Status, wenn die Aufgabe abgeschlossen ist.

4.5.6 Ergebnis des Usability-Tests mit Endnutzenden

Die Ergebnisse des Usability-Tests wurden in einer Tabelle dargestellt. Die höchsten Werte erhielten die Interaktionsprinzipien Aufgabenangemessenheit ($M=2.23$; $SD=0.82$) und Lernangemessenheit ($M=2.11$; $SD=1.01$). Dahinter folgt das Prinzip der Selbstbeschreibungsfähigkeit ($M=2.00$; $SD=0.81$). Die Übereinstimmung mit den Nutzererwartungen ($M=2.09$; $SD=0.79$) erreicht ebenfalls ein gutes Ergebnis, wenn auch mit einer etwas niedrigeren Bewertung. Die Interaktionsprinzipien Fehlertoleranz ($M=1.19$; $SD=0.96$) und Individualisierbarkeit ($M=1.11$; $SD=1.32$) schneiden am schlechtesten ab. Die Fehlertoleranz wurde weniger positiv bewertet, da im Mockup keine echten Fehlermeldungen oder andere Probleme mit dem System auftraten. Auch bei der Individualisierbarkeit wurde im Mockup nicht viel Wert auf die Anpassbarkeit oder Editierbarkeit des Systems gelegt. Dies wurde von den Testpersonen nicht negativ, sondern eher neutral bewertet. Die Gesamtbewertung ist mit $M=1.8$ ($SD=0.77$) relativ gut. Hinsichtlich der Wichtigkeit der Prinzipien für den Anwendungsfall werden die Prinzipien Selbstbeschreibungsfähigkeit ($M=2.06$; $SD=1.18$), Erlernbarkeit ($M=1.88$; $SD=1.15$), Übereinstimmung mit Nutzererwartungen ($M=1.81$; $SD=1.11$) und Kontrollierbarkeit ($M=1.81$; $SD=1.33$) als besonders wichtig angesehen. Etwas weniger wichtig werden Fehlertoleranz ($M=1.56$; $SD=1.41$) und Aufgabenangemessenheit ($M=1.5$; $SD=1.32$) eingeschätzt. Das Prinzip der Individualisierbarkeit ($M=0.63$; $SD=1.50$) scheint eher unwichtig zu sein. Die hohe Varianz bei den Faktoren ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass einige Faktoren bei der Gestaltung der GUI nicht hoch gewichtet wurden (z.B. Individualisierbarkeit). Ebenso haben die Tester unterschiedliche Wahrnehmungen der Faktoren. Da es sich hierbei um subjektive Einschätzungen handelt, die von den Teilnehmern im Fragebogen eingetragen, aber nicht begründet wurden, bleiben diese Fragen unbeantwortet. Abbildung 48 zeigt das Ergebnis des Usability-Tests und die Gewichtung der Gestaltungsprinzipien.

Abbildung 48*Ergebnis des Usability-Tests und Gewichtung der Prinzipien***4.6 Diskussion****4.6.1 Interpretation der Ergebnisse**

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Methodenkombination für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess - umgesetzt als interaktives Mockup - unter Berücksichtigung von Gebrauchstauglichkeit in einem mobilen MRK an Montagearbeitsplätzen. Die Auswahl und Kombination bestehender Methoden für nutzerzentriertes Design ist enorm vielfältig und immer kontextabhängig, und diese Forschungsarbeit spezifiziert eine Kombination von Methoden für die Gestaltung von GUIs in diesem wenig erforschten Bereich. Obwohl es eine Vielzahl verwandter Arbeiten gibt, wird in dieser Arbeit der Ansatz eines Designprozesses mit exemplarischen Methoden detailliert beschrieben. Der nutzerzentrierte Designprozess wurde in zwei Iterationen durchgeführt, wobei die erste Iteration aus Analyse, Design und Evaluation bestand. Die zweite Iteration besteht aus Design und Evaluation. Der iterative Designprozess, wie er für das mobile Assistenzsystem (Waechter, Hoehnel, Loeffler, & Bullinger-Hoffmann, 2017) angewandt wurde, ermöglichte schnelle Feedbackschleifen und Erkenntnisse. Das Regelkreismodell für nutzerzentrierte MRK (Nelles, Brandl, & Mertens, 2018) ist auch im Kontext der mobilen MRK anwendbar, da die genannten Komponenten "Mensch", "Roboter" und "nutzerzentrierter Gestaltungsprozess" zu dieser Forschung passen. Das Modell kann als Äquivalent zum iterativen Prozess betrachtet werden. Die Einteilung der Phasen in Analyse, Design und Evaluation im Vergleich zur Forschung über Benutzungsschnittstellen für MRK an Produktionsarbeitsplätzen (Schleicher, 2018) wurde auch in dieser Arbeit verwendet und hat sich als sinnvoll erwiesen. Als Grundlage

diente das im Vorfeld entwickelte Wireframe, das mit dem Fokus auf Situationsbewusstsein gestaltet wurde. Um eine Nutzeranalyse zu erhalten, wurden im ersten Schritt zwei Befragungen durchgeführt. Die erste war eine quantitative Studie, um bekannte und gewünschte Eingabemodalitäten der GUI abzufragen. Die zweite war eine qualitative Befragung, um relevante Informationen über die Bekanntheit und Zufriedenheit mit Touch-Schnittstellen bei der relevanten Zielgruppe der Montagearbeiter zu erhalten. Die erste Befragung ergab recht eindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Bekanntheit von Touch-Interfaces. Die anschließende qualitative Befragung zu Touch-Interfaces ergab lediglich, dass fast alle Befragten Geräte mit Touch-Interfaces kennen und die größte Zufriedenheit mit Smartphone-Apps besteht. Für die Analysephase fällt auf, dass in keiner der verwandten Arbeiten eine Nutzeranalyse durchgeführt wurde, obwohl sie sich in dieser Forschung als wichtiger Ansatz zum Verständnis der Nutzer herausgestellt hat. Im zweiten Schritt, der Designphase, wurde ein interaktives Mockup entwickelt. Diese Arbeit erwähnt nicht nur die Tatsache, dass ISO 9241-110 angewendet wurde, wie es in verwandten Arbeiten über Serviceroboter der Fall ist (Poeschl, Doering, Boehme, & Martin, 2009; Doering, et al., 2015), sondern benennt genau die angewandten Prinzipien und erweitert die Anwendung um die Teile DIN EN ISO 9241-112 und 13, wie in DIN EN ISO 9241-210 empfohlen.

Es hat sich gezeigt, dass die Prinzipien grundsätzlich ein gutes und wichtiges Werkzeug sind, das auch auf die GUI für mobile MRK übertragen werden kann. Die Beispiele in der Norm waren ursprünglich für den Kontext von Computerarbeitsplätzen gedacht, und dies ist auch oft zu erkennen. Um die abstrakten Formulierungen der Prinzipien auf den Kontext des mobilen MRK zu übertragen, ist ein gewisses Maß an Kreativität und Usability-Erfahrung erforderlich. Bei der Anwendung mehrerer Teile wird irgendwann Redundanz auftreten, da mehrere Gestaltungsprinzipien zum gleichen Gestaltungsmerkmal führen. Ein Schema, welche Prinzipien redundant sind, wurde nicht untersucht. Zukünftige Arbeiten können diesen Aspekt aufgreifen und systematisch untersuchen. Durch die Anwendung der Gestaltungsprinzipien aus DIN EN ISO 9241 wurde im Prinzip eine GUI entworfen, die die Gebrauchstauglichkeit fördert. Situationsbewusstsein ist in der Norm nicht berücksichtigt und konnte nur durch die Vorarbeit des Wireframes erreicht werden. Der Ansatz aus GDTA und Designprinzipien für Situationsbewusstsein ist essenziell. Eine weitere Evaluation mit dem interaktiven Mockup war die heuristische Evaluation nach Nielsen, die mit Usability-Fachkräften durchgeführt wurde. Im Vergleich zu den allgemein gültigen Gestaltungsprinzipien konnte die heuristische Evaluation prägnante Verbesserungsvorschläge aufzeigen. Sie hat sich als ökonomische Evaluationsmethode erwiesen, wie in der Literatur nachzulesen ist (Held & Schrepp, 2019)

(Nielsen & Molich, 1990). Die erste Iteration wurde mit einer Evaluationsphase abgeschlossen, um ein frühes Feedback zu erhalten, das in einem High Fidelity Prototyp umgesetzt wurde.

In der zweiten Iteration wurden die Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge aus den Evaluationen in das High Fidelity GUI-Design implementiert. Ebenso wurde der intuitive Programmiermodus des Roboters integriert. Der ganzheitliche Ansatz besteht aus der gemeinsamen Montage von Bauteilen und der Möglichkeit, während der Montage selbständig neue Schritte zu programmieren. Der Modus zur intuitiven Roboterprogrammierung wurde anhand eines Beispielscreens angedeutet und im Usability-Test nicht weiter evaluiert, da bereits in der Studie zur intuitiven Roboterprogrammierung umfangreiche Tests mit potenziellen Endnutzenden durchgeführt wurden. Relevant war lediglich, dass die Probanden verstehen, wie sie in den Programmiermodus gelangen, wie dieser im Vergleich zum MRK-Arbeitsmodus aussieht und zu welchem Zweck es einen Programmiermodus gibt, den die Werkspersonen bedienen können. Die Bewertung des High Fidelity Mockups erfolgte durch einen Usability-Test unter Verwendung des standardisierten Fragebogens ISONORM 9241/110, der auf den Gestaltungsrichtlinien der Version 2006 der entsprechenden Norm basiert, weshalb diese Version der Norm auch für das Design verwendet wurde. Eine Anwendung des Fragebogens *System Usability Scale* im Vergleich zur Rollstuhlroboter-GUI (Rupp, Parkhurst, & Smither, 2016) und dem mobilen Roboter für die Altenpflege (Olatunji, et al., 2022) wäre auch eine Alternative in dieser Arbeit. Der Fragebogen ISONORM 9241/110 fragt jedoch genau nach den Prinzipien der angewandten Norm. Die Taxonomie mit der Sammlung von Usability-Methoden (Ivory & Hearst, 2001; Sawasdichai, 2004) war zwar hilfreich, um sich einen Überblick zu verschaffen, aber es ist nicht sofort ersichtlich, welche Methoden für welchen Kontext verwendet werden sollten. Dies sollte intuitiv geschehen, da sich der Erfolg einer Methode erst bei der Evaluation zeigt. Die sehr guten Ergebnisse des Usability-Tests mit Endnutzern deuten darauf hin, dass die gewählten vorangegangenen Prozessphasen zu einer Optimierung der Bedienoberfläche geführt haben. Es zeichnet sich ab, dass die Anwendung der hier eingesetzten Methoden auch bei einer erneuten Anwendung in einem ähnlichen Kontext zu einem erfolgreichen Ergebnis führen würde. Damit wäre eine Generalisierbarkeit gegeben. Während einige Arbeiten zum mobilen MRK technologieorientiert sind (Intisar, Khan, Islam, & Masud, 2021; Siregar, Syahputra, & Mustar, 2017; Berg & Lu, Review of interfaces for industrial human-robot interaction, 2020; Schmatz, Beuss, Sender, & Fluegge, 2020), bezieht sich diese Arbeit auf ein nutzerzentriertes Design und schließt die Forschungslücke, Methoden entlang des gesamten Designprozesses zu identifizieren, die zu optimierten Benutzungsschnittstellen führen.

4.6.2 Limitationen

Wie bereits erwähnt, wurde in der vorliegenden Arbeit ein intuitiver Ansatz für die Gestaltung der grafischen Bedienoberfläche gewählt. Dieser Ansatz hat zu zufriedenstellenden Ergebnissen geführt. Dies schließt jedoch nicht aus, dass es geeignetere Methoden für die Durchführung des Entwurfsprozesses gibt. Um den optimalen Ansatz zu finden, müssten die Methoden direkt miteinander verglichen werden. Weitere Teile der DIN EN ISO 9241, wie sie in der DIN EN ISO 9241-210 empfohlen werden, wurden nicht angewendet, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Es wurde nicht untersucht, welchen Unterschied eine Gestaltung ohne Gestaltungsgrundsätze machen würde. Usability-Experten mit Erfahrung im GUI-Design sind grundsätzlich mit den Gestaltungsprinzipien der DIN EN ISO 9241-110 vertraut. Das Experiment müsste mit Personen durchgeführt werden, die keine Erfahrung im Interface-Design haben. Bei der Messung des Situationsbewusstseins können trotz der sehr guten Ergebnisse verschiedene Einflussfaktoren die Bewertung begünstigt haben. Beispielsweise könnten die Fragen zu ähnlich zu den Begriffen der GUI gewesen sein, z.B. "Dosierung". Die Beschränkung auf vier Aufgaben könnte die Anwendung und Informationsaufnahme erleichtert haben. Die Tatsache, dass der Tester die Aufgabe nicht tatsächlich ausgeführt hat, könnte ihm mehr Zeit zum Nachdenken und Vorausschauen gegeben haben. Weitere Untersuchungen könnten diese Aspekte berücksichtigen.

5 Studie 3: Intuitive Roboterprogrammierung

Die Texte und Abbildungen in diesem Kapitel basieren auf der Postprint-Version der folgenden wissenschaftlichen Arbeit:

Colceriu, C., Riedl, M., Henrich, D., Brell-Cokcan, S., & Nitsch, V. (2020). User-centered design of an intuitive robot playback programming system. In *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics* (pp. 193-203). Springer Berlin Heidelberg.

Der Doktorand war für das Verfassen des Artikels sowie für die Koordination der wissenschaftlichen Arbeit verantwortlich. Die Co-Autorenschaft hat gleichermaßen als wissenschaftliche Beratende und Korrekturlesende beigetragen.

5.1 Hintergrund

Ziel der Studie ist es, ein intuitives Roboter-Programmiersystem zu gestalten, das auch von Nicht-Fachkräften mit wenig oder keiner Programmiererfahrung verwendet werden kann. Als Ansatz wird ein bestehendes Playback-Programmiersystem verwendet, das für Personen ohne Programmierkenntnisse entwickelt wurde (Riedl & Henrich, 2019). Die Roboterprogrammierung mit diesem System erfolgt durch manuelles Führen des Roboters entlang der gewünschten Bahn. Anschließend wird das aufgezeichnete Roboterprogramm entlang einer Zeitleiste in der Bedienoberfläche angezeigt. Das Playback Programmiersystem wurde an Videobearbeitungs-Software angelehnt entwickelt, so dass die Interaktion Ähnlichkeiten aufweist. In dieser Arbeit wird unter anderem die Analogie der Videobearbeitungs-Software verallgemeinert, um die bekanntesten Programme zum Editieren von Elementen für die Zielgruppe zu identifizieren. Die Zielgruppe für dieses Programmiersystem sind Werkskräfte, die normalerweise in der Industrie im Bereich Montage arbeiten. Als sogenannte „Editiersoftware“ kommen Textverarbeitungsprogramme (z.B. *Microsoft Word*, *OpenOffice Writer*), Videobearbeitungs-Software (z.B. *Adobe Premiere*, *Apple Final Cut*) und Audibearbeitungs-Software (z.B. *Adobe Audition*, *Steinberg Cubase*) in Frage.

Das aktuelle Playback-Programmiersystem für Roboter ist in Bezug auf Intuitivität noch verbesserungswürdig. Daher wird in dieser Studie ein Ansatz zur Gestaltung einer intuitiven Benutzungsschnittstelle für Touchscreens und deren Evaluierung vorgestellt. Touchscreens ermöglichen tendenziell intuitivere Interaktionen als Tastatur-Maus-Kombinationen

(Siegenthaler et al., 2012). Zur Umstellung auf ein Touchsystem müsste die Interaktion an Videobearbeitungs-Apps für Tablets angelehnt sein. Bekannte und häufig heruntergeladene Apps sind z.B. *YouCut*, *InShot*, *CapCut* und *Power Director* mit jeweils über 100 Mio. Downloads (Google, 2023).

Dieser Beitrag ist der Prozess, wie eine Schnittstelle für ein intuitives Roboterprogrammiersystem gestaltet werden kann, das über einen Touchscreen gesteuert wird. Die Zielgruppe ist in ihrer täglichen Arbeit für die Montage von Baugruppen zuständig. Montageroboter, wie sie in der Industrie eingesetzt werden, werden hingegen von Fachkräften programmiert, die handwerklich nichts mit Montagetätigkeiten zu tun haben. Es ist jedoch ungewiss, ob Werkkräfte für Montageanwendungen solche Apps grundsätzlich verwenden und Erfahrung damit haben. Dies gilt es zu identifizieren. Relevant ist auch die Information, welche Art von Editier-Software von den Werkkräften verwendet wird. Die Software kann untersucht werden und ihre Interaktionsprinzipien und Gestaltungselemente können auf die GUI für intuitive Roboterprogrammierung übertragen werden. Die Studie ist eine Weiterführung der Forschungsarbeit für die Playback Programmierung. Die bestehende, bereits implementierte GUI zur Roboterprogrammierung, die mit Maus und Tastatur bedient wird, wird auf ein Display mit Touchfunktion übertragen.

5.2 Verwandte Arbeiten

Um einen Überblick über das Gebiet der Gestaltung intuitiver Roboterprogrammiersysteme zu erhalten, müssen zwei Untersuchungsbereiche betrachtet werden. Der erste Teil befasst sich mit der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen im Allgemeinen, während der zweite Teil die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der intuitiven Roboterprogrammiersysteme darstellt.

Aktuelle Forschung versucht, die Programmierung von Robotern so einfach wie möglich zu gestalten, indem Methoden verwendet werden, die von Benutzenden nicht das Schreiben von Quellcode erfordern. Es gibt verschiedene Ansätze, um dies zu erreichen. Ein Ansatz ist die Demonstrationsprogrammierung, bei der der Roboter entweder manuell durch seine Aufgabe geführt wird (Orendt et al., 2016) oder die Roboterbewegung durch Beobachtung von Nutzenden mit Hilfe von Sensoren lernt (Billard et al., 2008). Andere intuitive Ansätze sind die Verwendung von Handheld-Geräten (Neto et al., 2010), Smartphones (Mateo et al., 2014), Touchscreens (Kraft & Rickert, 2017), visueller Programmierung in CAD (Stumm et al., 2016) oder virtueller Realität (Krot & Kutia, 2019) zur Programmierung von Robotern. All diese

Ansätze haben gemeinsam, dass sie eine Art Schnittstelle benötigen, um Informationen mit Bedienenden auszutauschen. Meistens wird ein Bildschirm verwendet, um mit dem Roboter zu interagieren, jedoch wird der eigentliche Designprozess zur Entwicklung der intuitiven Benutzungsschnittstelle nicht aufgezeigt. Daher besteht ein Bedarf an einem Designprozess für Benutzungsschnittstellen für die Roboterprogrammierung. In den folgenden Abschnitten versuchen wir, diese Lücke zu schließen, indem wir einen Designprozess für Benutzungsschnittstellen zur Roboterprogrammierung vorstellen.

Bestehende Forschung zum Thema Playback Programmierung behandelt Implementierung und Evaluierung der Software (Riedl & Henrich, 2019). Ebenso die Implementierung weiterer Features wie *Loops* und *Branches* (Riedl, Orendt, & Henrich, 2018). Vergleichbare Arbeiten der intuitiven Roboterprogrammierung sind das System *RAZER* (Steinmetz, Wollschläger, & Weitschat, 2018), das Visual Task-Level Programming einsetzt, und die *Festo Robotic Suite*, die Drag- and Drop Funktionen verwendet, um Bewegungsabläufe des Roboters zu programmieren (Festo, 2023).

5.3 Motivation und Forschungsfrage

Ein Ziel der GUI-Gestaltung ist es, dass es Werkskräften möglich ist, kooperative Roboter spontan und intuitiv bei der Durchführung der gemeinsamen Arbeitsaufgabe programmieren zu können. Technisch wird als Ausgangspunkt das Playback Programmiersystem verwendet, das durch Handführung des Roboterarms aufgenommen wird. Die Entwicklung sollte mittels geeigneter Methoden zur nutzerzentrierten Gestaltung erfolgen. Es stellt sich die Forschungsfrage: Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI für intuitive Roboterprogrammierung im Kontext der MRK gestaltet werden?

5.4 Methodik

Die Methoden zur Entwicklung der GUI lassen sich in dieser Studie ebenso in Analyse, Gestaltung und Evaluierung einteilen. Methoden der Analysephase sind die quantitative Befragung durch Werkskräfte bezogen auf Erfahrung mit Roboterprogrammierung und Editier-Software, sowie eine Produktanalyse der Softwaresysteme, die am bekanntesten sind für die Personen. In der Gestaltungsphase wird ein Papierprototyp erstellt und ein virtuelles, interaktives Mockup gestaltet. Als Methoden zur Evaluierung für intuitive

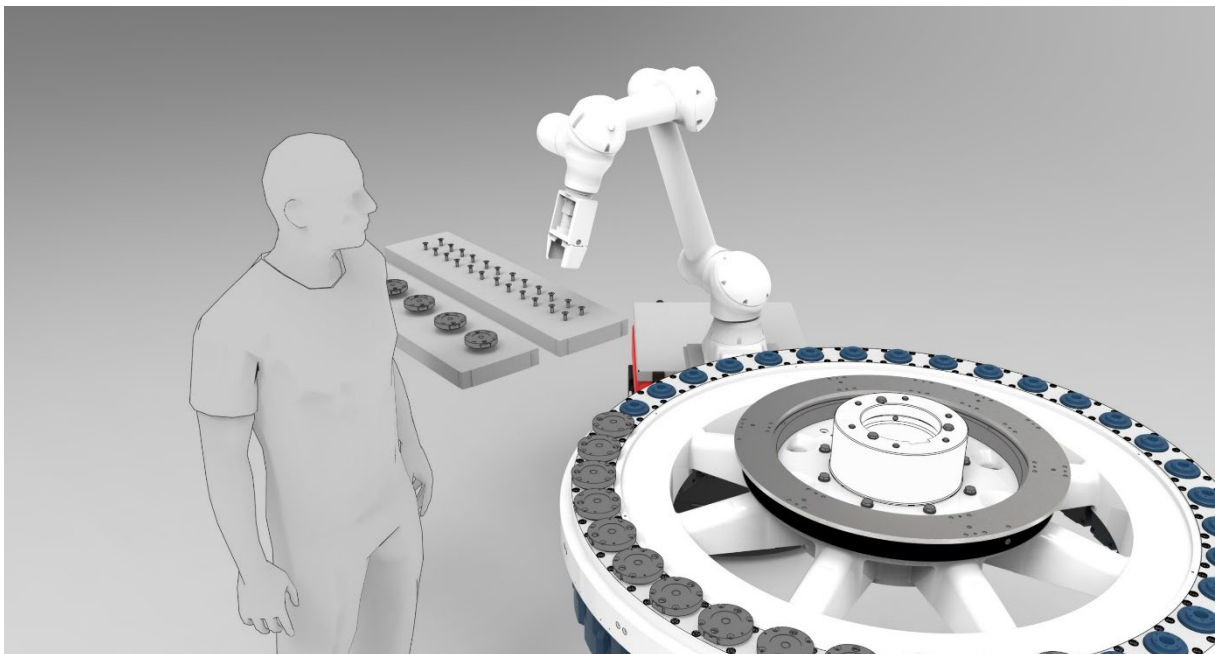
Roboterprogrammierung werden die Heuristische Evaluierung nach Nielsen und ein Test zur intuitiven Nutzung mit dem MINERIC Toolkit angewandt.

5.4.1 Experimentelle Aufgabe

Die experimentelle Arbeitsaufgabe, die exemplarisch für einen der Montageschritte verwendet wird, ist abgeleitet von der Montage von Mitnahmescheiben, die auf die Motorwellen positioniert und mit Senkschrauben verschraubt werden. Der Roboter montiert die Scheiben bzw. schraubt die Senkschrauben in die Mitnahmescheiben ein. Je nachdem, ob bereits eine Scheibe befestigt wurde, Schrauben eingesetzt wurden oder nichts von beidem, erfasst der Roboter mittels Kamera den aktuellen Zustand und reagiert darauf. Abbildung 49 stellt die Arbeitsaufgabe der Behälterscheiben-Montage als Mensch-Roboter-Kooperation dar.

Abbildung 49

Experimentelle Aufgabe

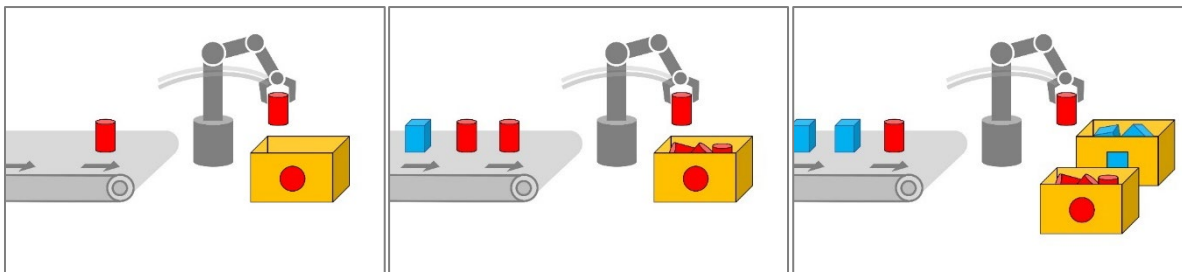


Die Arbeitsaufgabe wurde aus Gründen der Vereinfachung umgewandelt und in drei Aufgaben eingeteilt. In Aufgabe 1 müssen rote Zylinder, die auf einem Laufband immer an derselben Stelle ankommen, vom Roboter gegriffen und in eine Schachtel gelegt werden. Diese Pick-and-Place Bewegung soll einmal wiederholt werden. In Aufgabe 2 soll der Roboter ebenso rote Zylinder in eine Box legen. Mit dem Unterschied, dass er sofort stoppen soll, falls es kein roter Zylinder ist, der ankommt. Dies entspricht in der Praxis einem Ausschussteil, das erkannt

werden soll, wenn es auf dem Laufband ankommt. In Aufgabe 3 verfahren abwechselnd rote Zylinder und blaue Würfel auf dem Laufband. Wenn ein roter Zylinder ankommt, soll er in die Box für rote Zylinder gelegt werden. Wenn ein blauer Würfel ankommt, soll der Roboter ihn aufnehmen und in die Box für blaue Würfel legen. Dies entspricht in der Praxis dem Erfassen des Zustands auf dem Behältertisch. Je nach aktueller Montagesituation erfasst sie der Roboter und reagiert entsprechend darauf. Abbildung 50 stellt die experimentellen Aufgaben zur Evaluierung des Roboterprogrammiersystems schematisch dar.

Abbildung 50

Experimentelle Aufgaben zur Evaluierung des Roboterprogrammiersystems



5.4.2 Methode der quantitativen Studie zu Softwarekenntnissen

Um zu identifizieren, wie gut die Programmierkenntnisse von Werkskräften sind und welche Erfahrung sie mit Editiersoftware haben, wird in einer qualitativen Befragung mit einem strukturierten Fragebogen ermittelt. Die Studie wurde mit 20 Teilnehmenden durchgeführt. Bei allen Teilnehmern handelte es sich um Mitarbeitenden aus dem Montagebereich im Alter von 21 bis 57 Jahren mit einem Durchschnittsalter von $M = 38,7$ Jahren und einer Standardabweichung von $SD = 9,7$ Jahren. Die anzuwählenden Optionen sind folgende: Textverarbeitung mit Maus und Tastatur, Textverarbeitung mit Touch, Videobearbeitung mit Maus und Tastatur, Videobearbeitung mit Touch, Audibearbeitung mit Maus und Tastatur, Audibearbeitung mit Touch, allgemein Apps mit Smartphone, allgemein Apps mit Tablet, allgemein Programmieren, Programmiersprachen, Programmieren von Robotern, Roboter Programmiersprachen.

5.4.3 Methode der Produktanalyse von Editiersoftware

Bei der Produktanalyse von Editiersoftware werden Programme untersucht, die Werkskräfte der Montage häufig verwenden oder denen sie bekannt sind. Dabei wird z.B. die Darstellung

von grafischen Elementen, Positionierung von Inhalten und Bildaufteilung untersucht. Ebenso relevant ist die Interaktion mit dem Programm, bezogen auf Menüführung, Auswählen von Objekten oder häufige Funktionen (Ausschneiden, Kopieren, Einfügen etc.) betrachtet.

5.4.4 Methode der Gestaltung von Papierprototyp und interaktives Mockup

Ziel der Designimplementierung ist es, ein intuitiv bedienbares Interface zu entwickeln. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Papierprototyp und anschließend ein interaktives virtuelles Mockup erstellt.

Das Interface orientiert sich an Textverarbeitungs-Software, weil diese von den meisten Personen verwendet wird. Das Interface ist nach Gestaltungsprinzipien für intuitive Nutzung gestaltet (McKay & Musgrave, 2018): *Auffindbarkeit, Aufforderungscharakter, Verständlichkeit, Responsive Feedback, Vorhersehbarkeit, Effizienz, Nachsichtigkeit und Erforschbarkeit*. Ebenso wurden Prinzipien zur intuitiven Gestaltung der Norm DIN 9241-110 (Deutsches Institut für Normung eV., 2020) angewandt, die in den Arbeiten der IUUI-Gruppe als *Förderlich für intuitive Nutzung* gewertet wurde (siehe Kap. 2.2.3). Dabei wurden Prinzipien, die einen besseren Wert erhalten haben, intensiver behandelt als solche, die einen schlechteren Wert erhalten haben.

Erwartungskonformität: Anerkannte Konventionen sind in der Funktionsleiste umgesetzt worden. Reihenfolge und Icons entsprechen den Funktionen in Textverarbeitungs-Software. Die Konsistenz des Systems wird z.B. umgesetzt, indem zum Betätigen der Funktionen Ausschneiden, kopieren, löschen, Schleife und Verzweigung jedes Mal davor der Abschnitt einer Spur markiert wird.

Selbstbeschreibungsfähigkeit: Die Funktionen werden nonverbal kommuniziert. Auf den Buttons der Funktionsleiste sind lediglich Icons abgebildet.

Aufgabenangemessenheit: Es sind diejenigen Buttons aktiv und gut sichtbar, die in der jeweiligen Situation auch betätigt werden können. Die Funktion *Einfügen* erscheint nur, wenn ein Abschnitt einer Spur in die Zwischenablage kopiert wurde.

Steuerbarkeit: Ein fehlerhaft aufgenommenes Bild kann wiederholt aufgenommen werden. Eine Aufzeichnung kann abschnittsweise gelöscht oder komplett neu aufgezeichnet werden.

Lernförderlichkeit: Eine Undo- und Redo-Funktion wurde vorgesehen, um Fehler beim Bearbeiten der Spur wieder rückgängig machen zu können.

Außerhalb der Normen spielen auch Gestaltungsgesetze eine Rolle bei der Konzipierung von intuitiv bedienbaren Benutzungsschnittstellen (Mohs C. , et al., 2006). Gestaltgesetze sind Erfahrungsregeln, die Bedeutungszusammenhänge zwischen Objekten herstellen, durch Anordnung, Formgebung und farbliche Charakteristika (Heinecke, 2011, S. 63f). Folgende Gestaltgesetze sind in der Literatur zu finden (Thesmann, 2016): das Gesetz der Ähnlichkeit besagt, dass zusammengehörende Elemente durch Ähnlichkeiten erkannt werden. Das Gesetz der Nähe besagt, dass räumlich nahe beieinander liegende Elemente als zusammengehörig erkannt werden. Das Gesetz der Prägnanz besagt, dass die Darstellung von Elementen, die sich deutlich vom Rest unterscheiden und abheben, die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich zu ziehen. Das Gesetz der Erfahrung besagt, dass Elemente, die aus der Erfahrung bekannt sind, in der Wahrnehmung automatisch vervollständigt werden.

Das Mockup erfolgt als Papierprototyp, um für die Evaluierung ein interaktives Modell zu generieren, wie in der Literatur methodisch beschrieben (Snyder, 2004). Das interaktive Mockup dient der Testung mit potenziellen Endnutzenden.

5.4.5 Methode der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen

Die Evaluierung erfolgt als Heuristische Evaluierung nach Nielsen (Nielsen & Molich, 1990). Es wurde mit drei Usability-Fachkräften durchgeführt, die diese Arbeit auch in ihrem Beruf erledigen. Der Papierprototyp aus der Entwurfsphase wurde unter intuitiven Gesichtspunkten bewertet. Es wurde individuell mit jeder Person durchgeführt. Zunächst wurde die teilnehmende Person durch die einzelnen Funktionen des Systems geführt. Drei zu lösende Aufgaben wurden beschrieben. Am Ende mussten alle Teilnehmenden den Fragebogen für die heuristische Auswertung ausfüllen.

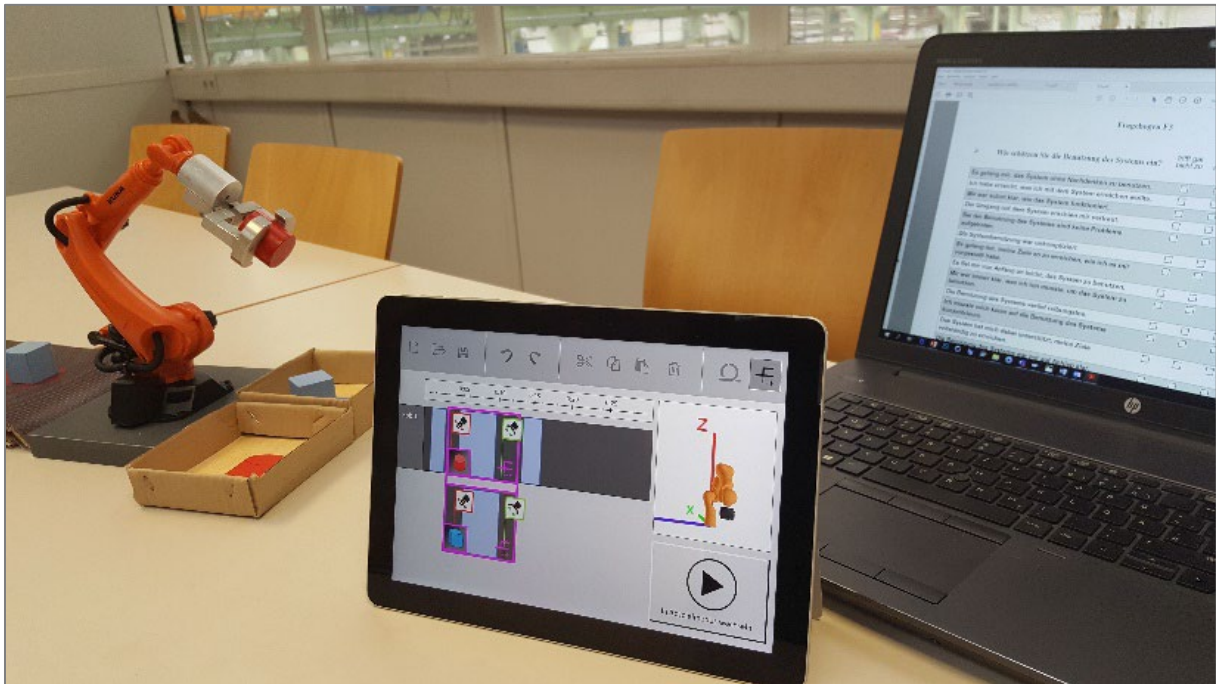
5.4.6 Methode des Tests zur intuitiven Nutzung mit Endnutzenden

Während der zweiten Iteration des Designprozesses führten wir eine Anwenderstudie mit dem MINERIC Toolkit (Orendt et al., 2017) durch. Das MINERIC Toolkit ist eine Kombination von Methoden, das für die Evaluation von Roboterprogrammiersystemen entwickelt wurde. Dabei werden Aspekte wie Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit mit einbezogen. Die Effektivität eines Programmiersystems wird anhand von Präzision und Vollständigkeit der Aufgabenerfüllung gemessen, wobei die PAC-U Skala (Precision and Completeness for User) verwendet wird. Diese Skala enthält Werte von 0 bis 3 für Präzision und Werte von 0 bis 2 für Vollständigkeit. Höhere Werte bedeuten eine höhere Präzision und Vollständigkeit bei der Aufgabenerfüllung. Die Effizienz des Systems wird mithilfe der Skala zur subjektiven

empfundene Anstrengung (Scale to measure Subjective Experienced Effort, SSEE) bewertet. Die Zufriedenheit der Benutzenden wird mithilfe des Fragebogens QUESI für die subjektiven Folgen der Nutzung erfasst. Der Fragebogen enthält 14 Fragen mit einer 5-Punkte-Likert-Skala, die von „Stimme überhaupt nicht zu“ (1) bis „Stimme voll und ganz zu“ (5) reicht. Die Fragen beziehen sich jeweils auf einem der fünf Kriterien subjektiver Folgen der Nutzung: Geringe geistige Arbeitsbelastung (Low subjective mental workload, W), hohe wahrgenommene Zielerreichung (high perceived achievement of goals, G), geringer wahrgenommener Lernaufwand (low perceived effort of learning, L), hohe Vertrautheit (high familiarity, F) und niedrige wahrgenommene Fehlerquote (low perceived error rate, E).

Die Robustheit des Programmiersystems, also seine Stabilität und Widerstandsfähigkeit gegenüber Fehlern, wird ebenfalls betrachtet. Hierbei werden die Wirksamkeit und Erfolg des Roboters sowie die Zufriedenheit der Bedienenden nach Ausführung der Roboterprogrammierung berücksichtigt. Die Wirksamkeit des Roboters wird mithilfe der PAC-R Skala (Precision and Completeness for Robot) gemessen.

Die Studie wurde mit 20 Teilnehmenden durchgeführt. Bei allen Teilnehmern handelte es sich um Werkkräfte aus dem Montagebereich im Alter von 21 bis 57 Jahren mit einem Durchschnittsalter von $M = 38,7$ Jahren und einer Standardabweichung von $SD = 9,7$ Jahren. Vor der Studie sah jeder Teilnehmende ein kurzes Video des Programmiersystems und erhielt eine Einführung in die Bedienoberfläche. Anschließend wurden die drei verschiedenen Aufgaben den Teilnehmern erklärt. Während der Studie mussten die Teilnehmer die Aufgaben mit Hilfe des entworfenen interaktiven virtuellen Modells einem skalierten, nicht automatisierten Robotermodell demonstrieren. Die erste Aufgabe war eine Pick-and-Place-Aufgabe mit Nachbearbeitung, bei der zwei rote Zylinder von einem Förderband aufgenommen und in der entsprechenden Box abgelegt werden mussten, damit sowohl die Aufzeichnung als auch die Bearbeitung von Roboterprogrammen ausgewertet werden können. Die zweite Aufgabe war eine sensorgestützte Wiederholung, bei der Objekte vom Förderband aufgenommen und in der entsprechenden Kiste abgelegt werden mussten, sofern es sich um rote Zylinder handelte. Die dritte Aufgabe war eine Sortieraufgabe, bei der Objekte von einem Förderband aufgenommen und nach ihrer Farbe sortiert werden mussten. Das Evaluationssetup ist in Abbildung 51 dargestellt.

Abbildung 51*Evaluationssetup für User Tests der Roboterprogrammierung***5.5 Ergebnisse****5.5.1 Ergebnis der quantitativen Studie zu Softwarekenntnissen**

Die Ergebnisse der quantitativen Befragung zu Programmier-Erfahrung und Kenntnisse über Editorsysteme wurden in Tabelle 5 festgehalten. Fast alle Teilnehmenden haben Erfahrungen mit Textverarbeitungs-Software mit Maus und Tastatur gemacht und allgemein Apps mit einem Smartphone benutzt. Fast genauso viele haben Apps mit einem Tablet und Textverarbeitungs-Software mit einem Touchdisplay benutzt. Etwas über die Hälfte der Teilnehmenden haben Videobearbeitungs-Software mit Maus und Tastatur benutzt. Ebenso knapp über die Hälfte haben Programmier-Erfahrung, wobei die häufigsten angegebenen Programmiersprachen SPS, C++ und S7 sind. Nur wenige der Befragten haben Erfahrung mit Audibearbeitungs-Software am Touchdisplay oder Programmiererfahrung mit Roboterprogrammierung gemacht.

Tabelle 6

Ergebnisse der quantitativen Befragung zu Programmier-Erfahrung und Kenntnisse über Editiersysteme

Textverarbeitung mit Maus und Tastatur	19 Teilnehmende (95%)
Textverarbeitung mit Touchdisplay	17 Teilnehmende (85%)
Videobearbeitung mit Maus und Tastatur	12 Teilnehmende (60%)
Videobearbeitung mit Touchdisplay	8 Teilnehmende (40%)
Audiobearbeitung mit Maus und Tastatur	10 Teilnehmende (50%)
Audiobearbeitung mit Touchdisplay	5 Teilnehmende (25%)
Allgemein Apps mit Smartphone	19 Teilnehmende (95%)
Allgemein Apps mit Tablet	18 Teilnehmende (90%)
Allgemein Programmieren	11 Teilnehmende (55%)
Programmiersprachen	SPS (x4), C++ (x3), S7 (x2), CNC, Turbo Pascal, CCT, Basics, CAD, VBA, C, Python, Laxome
Programmieren von Robotern	7 Teilnehmende (35%)
Roboter-Programmiersprachen	KUKA (x3), Stäubli, Arduino, Raspberry Pi

5.5.2 Ergebnis der Produktanalyse von Editiersoftware

Nachdem die quantitative Befragung ergeben hat, dass der Großteil der befragten Personen die Software zur Textbearbeitung kennen und verwenden, wird sie bzgl. Gestaltung und Interaktion analysiert. Es sind die Programme Microsoft Word und OpenOffice, die genauer betrachtet werden. Standardfunktionen wie *Neue Datei*, *Datei öffnen*, *Datei speichern*, *Ausschneiden*, *Kopieren* und *Einfügen* sind bei beiden Programmen vorhanden. Die Art der Darstellung unterscheidet sich, weil Word seit der Version von 2007 die Menüführung flexibler und kontextabhängig gestaltet hat, so dass die Icons in verschiedenen Situationen verschiedene Positionen und Größen haben. Zur Bearbeitung einer Textstelle muss ein Text markiert werden und dann entweder ausgeschnitten, kopiert, eingefügt oder gelöscht werden. Eine Funktion, die gerade nicht auswählbar ist, ist ausgegraut und inaktiv. Bei Video- und Audiobearbeitungs-

Systemen verhält es sich ähnlich. Hier wird eine Video- oder Audiospur aufgenommen und an die jeweilige Stelle in der Zeitleiste positioniert. Anschließend können auch diese Elemente ausgeschnitten, kopiert, eingefügt oder gelöscht werden. Sollten weitere Funktionen, wie z.B. Kursivschrift bei Text, Hall-Effekt bei Audiospuren oder Zeitlupen-Effekt bei Videospuren, angewandt werden, müssen die Spuren dafür markiert und die jeweilige Funktion aktiviert werden.

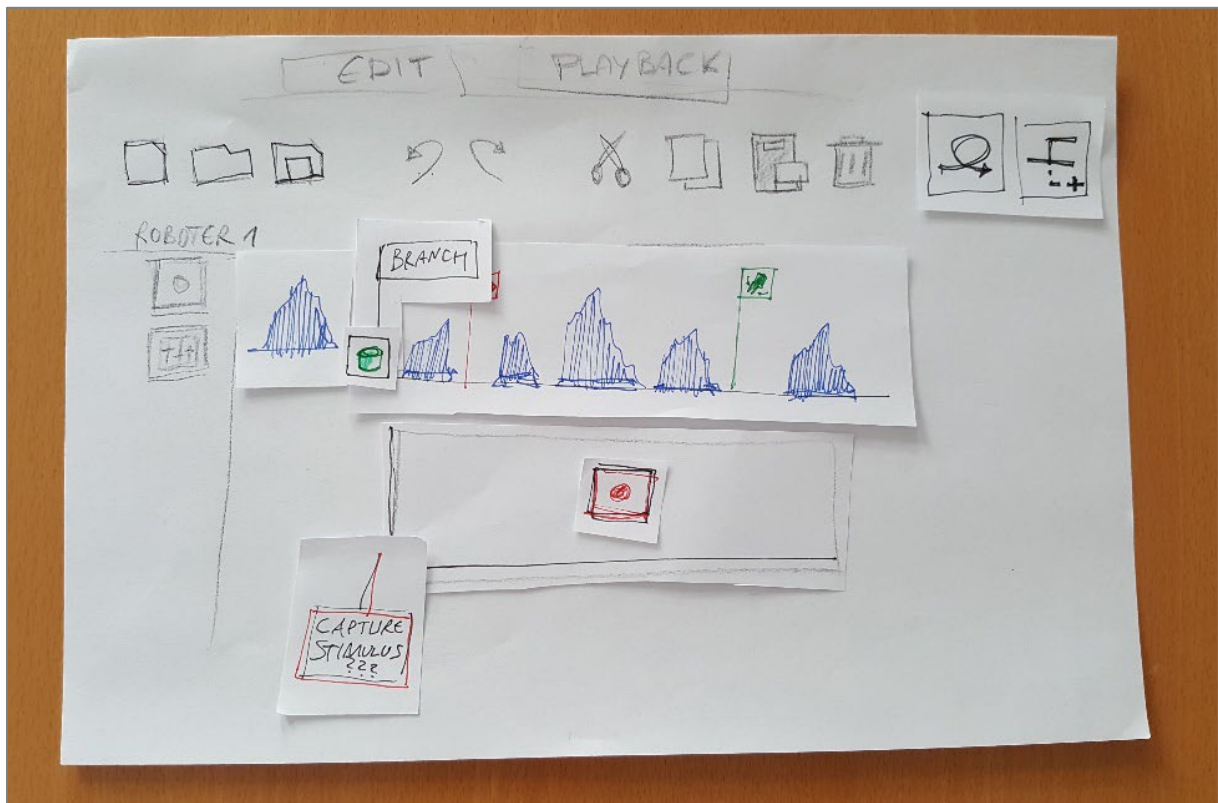
5.5.3 Ergebnis der Gestaltung des Papierprototyps

Die Bedienoberfläche ist an Textverarbeitungssoftware angelehnt. In das Design wurden mehrere Interaktionsprinzipien der Norm DIN EN ISO 9241-110 aufgenommen. Die Konformität mit den Nutzungserwartungen wurde durch die Implementierung bekannter Konventionen in der Symbolleiste und von Symbolen übernommen, die den Funktionen in der Textverarbeitungssoftware entsprechen. Die Selbstbeschreibung wurde durch Funktionen implementiert, die nonverbal kommuniziert werden. Auf den Schaltflächen der Symbolleiste werden nur Symbole angezeigt. Die Eignung für die Aufgabe wurde von aktiven Schaltflächen übernommen, die deutlich sichtbar sind, und Schaltflächen wie Einfügen, die nur angezeigt werden, wenn ein Abschnitt eines aufgezeichneten Roboterprogramms entlang einer Zeitachse in die Zwischenablage kopiert wurde. Zur Auswertung wird ein Papierprototyp erstellt, der in Abbildung 46 dargestellt ist. Erste Änderungen am ursprünglichen System für die Tastatur-Maus-Kombination werden vorgenommen. Die Anordnung der Schaltflächen in der Symbolleiste ist enthalten. Bei Schleifen und Verzweigungsfunktionen wird das zusätzliche Dialogfenster durch Schaltflächen ersetzt. Die Interaktion basiert auf der Bedienung einer Textverarbeitungssoftware mit Tastatur-Maus-Kombination. In einem Textverarbeitungsprogramm wird ein Wort markiert, indem man es anklickt und die Maus über das Wort zieht. Im Papierprototyp kann ein Teil des Roboterprogramms entlang der Zeitachse markiert werden, indem Sie es mit dem Finger berühren und den Finger entlang der aufgezeichneten Zeitachse bewegen. Wenn ein Abschnitt eines Roboterprogramms markiert ist, werden die Bearbeitungsfunktionen aktiviert. Die Oberfläche besteht aus einer Symbolleiste mit Funktionen. Die Funktionen sind unterteilt in Dateiverwaltungsfunktionen (neue Datei, Datei öffnen, Datei speichern), Rückgängig- / Wiederherstellungsfunktionen, Bearbeitungsfunktionen (Kopieren, Einfügen, Ausschneiden, Löschen) und Sonderfunktionen (Loops, Branches) (Riedl & Henrich, 2019). Bei der Aufnahme eines neuen Roboterprogramms für eine Zeitleiste wechselt die Oberfläche in den Aufnahmemodus und der Roboter muss manuell programmiert werden. Die Schaltfläche zum Öffnen des Greifers ist nur aktiv, wenn der Greifer

des Roboters geschlossen ist, und die Schaltfläche zum Schließen des Greifers ist nur aktiv, wenn der Greifer des Roboters geöffnet ist. Der resultierende Papierprototyp ist in Abbildung 52 dargestellt.

Abbildung 52

Entwurf des Papierprototyps



5.5.4 Ergebnis der Gestaltung des interaktiven Mockups

Die Gestaltung des interaktiven Mockups erfolgt als virtueller Prototyp, der mit potentiellen Endnutzenden getestet werden kann. Diejenigen Prinzipien der ISO 9241-110, die auch die intuitive Nutzung unterstützen, werden in die Gestaltung integriert. Ebenso werden Gestaltgesetze angewandt, wie das Ähnlichkeitsgesetz oder das Gesetz der Nähe. Das interaktive Mockup enthält eine Auswahl aus den acht Prinzipien für intuitive Nutzung. Auffindbarkeit entspricht z.B. dem Menü für den Robotergreifer, bei dem das restliche Interface verdunkelt angezeigt wird, damit es sich besser heraushebt. Der *Aufforderungscharakter* wird durch das Blinken von Buttons umgesetzt. *Verständlichkeit* ist der Erwartungskonformität ähnlich, so dass Funktionen wie Kopieren, Einfügen etc. gleich ablaufen wie in Textverarbeitungsprogrammen. *Effizienz* wird umgesetzt, indem die blinkenden Buttons einen

Denkanstoß zum Tätigen der nächsten Aktion geben. *Nachsichtigkeit* wird, wie es auch beim Prinzip Steuerbarkeit ist, dass Aufzeichnungen gelöscht und neu aufgenommen werden können. *Erforschbarkeit* ergibt ähnliche Funktionen wie Lernförderlichkeit, z.B. die Undo-/ Redo-Buttons. *Responsive Feedback* ist in den Rückmeldungen zu finden, z.B. dass man es grafische erkennt, sobald ein Button aktiviert wurde.

Die Verbesserungsvorschläge, die in der Heuristischen Evaluierung von den Expertinnen und Experten gemacht wurden, sind ebenso in das Mockup implementiert worden.

Das Design wurde konsistenter umgesetzt, so dass immer zuerst der Abschnitt markiert und dann die Funktion ausgewählt wird. Das Vokabular wurde ebenso angepasst, damit es zielgruppengerechter ist. Statt „Capture Stimulus“ lautet die Aussage nun „Bild aufnehmen“.

Die Selbstbeschreibungsfähigkeit wird durch die Gestaltung der Aufnahmetaste übernommen, die besonders vorhanden ist, wenn eine Aufnahme erwartet wird. Die Aufgabenangemessenheit wird umgesetzt, indem alle Schaltflächen konsistent inaktiv gestaltet werden, wenn die Funktion nicht verfügbar ist. Im Aufnahmemodus ist die Standardschnittstelle verdunkelt im Hintergrund dargestellt. Das Gesetz der Nähe wird durch das Gruppieren von Schaltflächen in der Symbolleiste aufgegriffen, um anzuzeigen, dass sie zu verschiedenen Themen gehören. Das Ähnlichkeitsgesetz wird von Symbolen für Greifer öffnen und Greifer schließen aufgegriffen, die im Aufzeichnungsmodus ähnlich aussehen, sodass sie im Thema als zusammengehörig erkannt werden können, sich jedoch farblich unterscheiden, damit sie nicht verwechselt werden. Das interaktive virtuelle Modell ist in Abbildung 53 dargestellt.

Die Interaktion ist der Bedienung von Textverarbeitungs-Software mit Computermaus nachempfunden. Diese markiert ein Objekt durch Klicken über die Wörter und das Ziehen der Maus entlang der Wörter. Im interaktiven Mockup wird eine Spur durch Berührung mit dem Finger markiert und des Fingers entlang der aufgenommenen Spur bewegt. Ist ein Abschnitt einer Spur markiert, werden die Funktionen aktiv, um die Spur zu bearbeiten.

Das Interface besteht aus einer Symbolleiste mit Funktionen. Die Funktionen sind eingeteilt in Dateiverwaltungs-Funktionen, *Undo/Redo* Funktionen, *Spurbearbeitungs-Funktionen* und Sonderfunktionen. *Dateiverwaltungs-Funktionen* sind die Befehle *Neue Datei*, die eine neue Programmdatei erstellt, *Datei öffnen*, die eine gespeicherte Datei öffnet und *Datei speichern*, die eine aktive Datei speichert. Die Ausbesserungs-Funktionen sind *Undo* und *Redo*. *Undo* macht die letzte Aktion rückgängig, *Redo* wiederholt die zuletzt rückgängig gemachte Aktion. *Spurbearbeitungs-Funktionen* sind die Befehle *Ausschneiden*, *Kopieren*, *Einfügen* und *Löschen*. *Ausschneiden* entfernt den markierten Abschnitt vom Bildschirm und speichert ihn in

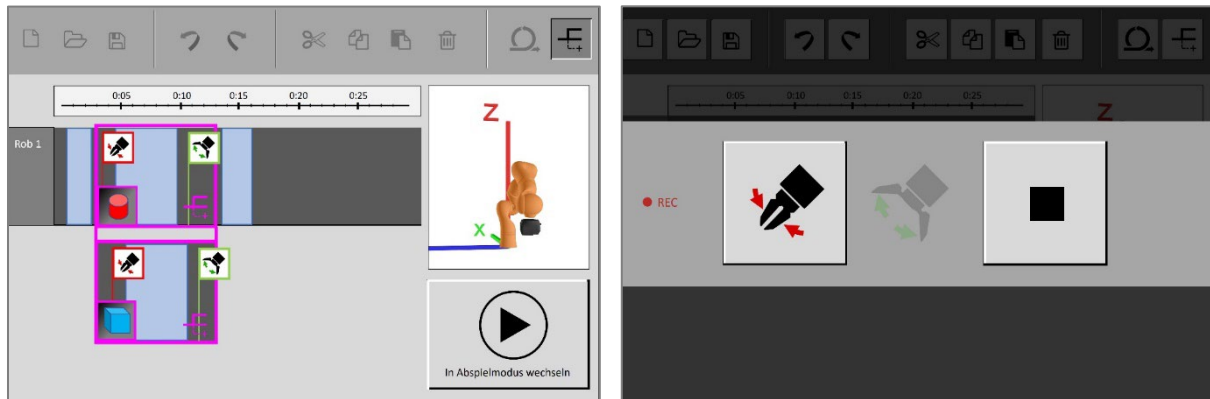
eine Zwischenablage, um ihn an anderer Stelle wieder einzufügen. *Kopieren* speichert die markierte Spur in eine Zwischenablage, um ihn an anderer Stelle wieder einzufügen. *Einfügen* fügt einen Abschnitt, der in der Zwischenablage gespeichert ist, in eine vorher festgelegte Einfügeposition. Diese Funktion ist erst aktiv, wenn sich ein Abschnitt in einer Zwischenablage befindet. Die Funktion *Löschen* entfernt den markierten Abschnitt.

Sonderfunktionen sind die *Loop-Funktion* und die *Branch-Funktion*. Die *Loop-Funktion* erstellt eine Wiederholung des markierten Abschnitts. Dazu wird der zu greifende Gegenstand mit einer Kamera erfasst. Die Wiederholung des Abschnitts findet jedes Mal statt, wenn der Gegenstand erkannt wird. Die *Branch-Funktion* erstellt eine Verzweigung des Abschnitts. Auch hier wird ein Bild des Gegenstands mit der Kamera aufgenommen. Die programmierte Aktion wird durchgeführt, wenn der Gegenstand erkannt wird. Das System erstellt eine weitere Spur, die eine Bildaufnahme und die Aufnahme einer Aktion erwartet. Das Abspielen der Spur entscheidet zu Beginn der Verzweigung durch Erkennen des Bildes, welche Aktion gewählt wird. Die Aufnahme einer Spur erfolgt durch Betätigen des Record-Buttons. Das Interface wechselt in den Aufnahmemodus; im Aufnahmemodus wird die handgeführte Programmierung aktiv. Auf dem Display kann der Greifer geöffnet, geschlossen oder die Aufnahme beendet werden. Der Button *Greifer öffnen* ist nur aktiv, wenn der Greifer am Roboterarm geschlossen ist. Der Button *Greifer schließen* ist aktiv, wenn der Greifer am Roboterarm geöffnet ist. Die Verbesserungsvorschläge, die in der Heuristischen Evaluierung niedergeschrieben wurden, sind in die Gestaltung eingeflossen.

Ebenso wurden die Gestaltungsprinzipien und Gestaltgesetz in das Mockup implementiert. Bezogen auf *Erwartungskonformität* wurde das Vokabular dahingehend geändert, dass Begriffe aus der Informationstechnologie (z.B. capture stimulus) in alltagstaugliche Begriffe umgeändert wurden („Bild aufnehmen“). *Selbstbeschreibungsfähigkeit* wurde implementiert, indem der Record Button besonders präsent ist, wenn eine Aufzeichnung erwartet wird. Zusätzlich wird der Nutzer durch einen blinkenden Text dazu geleitet, den Button zu betätigen. *Aufgabenangemessenheit* wurde mit einbezogen, indem alle Buttons, die zu einem Zeitpunkt nicht betätigt werden können, konsequent inaktiv gesetzt sind. Dazu gehört der Button „in den Abspielmodus wechseln“. Im Record-Modus ist das Standard-Interface stark abgedunkelt. Das *Gesetz der Nähe* wurde eingehalten, indem Buttons in der Funktionsleiste geclustert sind. Das *Gesetz der Gleichartigkeit* wurde durch das Greifer-Symbol in der Aufnahmespur umgesetzt.

Abbildung 53

Programmiermodus des Designs für das interaktive Mockup (links), Greifermenü (rechts)

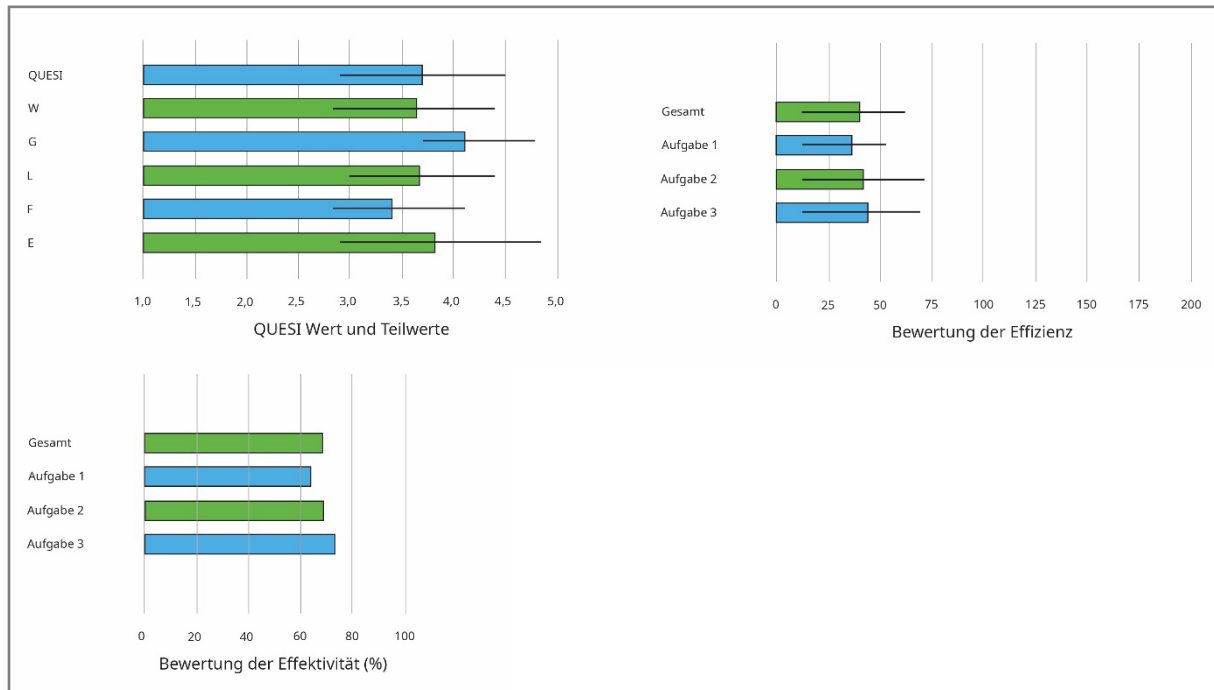
**5.5.5 Ergebnis der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen**

Zur Evaluierung des Papier-Prototyps wurde die Inspektionsmethode der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen angewandt. Die Äußerungen und Verbesserungsvorschläge der drei Usability-Fachkräfte haben einige Erkenntnisse gebracht, die sowohl übereinstimmende Meinungen beinhalten, als auch Vorschläge einzelner Personen. Der Hauptkommentar war, dass die Nutzung des Systems konsistent sein muss. Bei einigen Funktionen müssten zuerst Abschnitte markiert und dann die Funktion ausgelöst werden, bei anderen Funktionen war es umgekehrt. Ein weiterer Kommentar war, dass das verwendete Vokabular an die Zielgruppe angepasst werden sollte, damit es für sie verständlich ist. Die letzte wichtige Bemerkung der Experten lautete, dass Funktionen, die voraussichtlich als nächstes verwendet werden, stärker in die GUI integriert werden sollten. Mit Hilfe dieser Hauptkommentare und einiger kleinerer Notizen wurde das interaktive virtuelle Modell entworfen.

5.5.6 Ergebnis des Tests zur intuitiven Nutzung mit Endnutzenden

Ziel dieser Evaluierung war es, eine intuitive Bewertung der verbesserten Bedienoberfläche von Nichtfachleuten zu erhalten, nämlich von Arbeitern aus dem Bereich der Montage. Da Intuitivität laut MINERIC-Toolkit als eine Kombination aus Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit definiert wird, wurde der vorgestellte Ansatz zur Bewertung der Prototypen verwendet. Der detaillierte Auswertungsprozess ist in (Orendt et al., 2017) beschrieben. Die Effektivitätsbewertung ist in der linken Grafik von 5 dargestellt. Sie wird auf einer Skala von 0 bis 100 gemessen. Die Bewertung für das entworfene Modell beträgt 69%. Dies zeigt an, dass das System ziemlich effektiv zu verwenden ist. Darüber hinaus zeigt die Punktzahl für jede

Aufgabe, dass die Wirksamkeit kontinuierlich zunimmt, was darauf hinweist, dass ein Lerneffekt vorliegt und es einfacher ist, das Modell für jede Aufgabe zu verwenden. Die Effizienzbewertung ist in der mittleren Grafik in Abbildung 54 dargestellt. Ihr Wert reicht von 0 bis 220, wobei niedrigere Bewertungen eine bessere Effizienz anzeigen. Die Gesamtbewertung von $M = 39.2$ ($SD=23.5$) sagt aus, dass sich die Aufgaben mit geringem Aufwand bewältigen lassen. Eine leichte Steigerung der Effizienz gegenüber den drei Aufgaben kann damit erklärt werden, dass die letzten beiden Aufgaben sensorgestützte Schleifen und Verzweigungen enthielten, die schwerer zu verstehen sind. Die Zufriedenheitsbewertung wird in Form der QUESI-Bewertung und ihrer Teilwerte in Abbildung 54 angezeigt. Sie wird mit fünf Unterpunkten auf einer Skala von 1 bis 5 gemessen, wobei 5 bedeutet, dass die Teilnehmer mit dem System und 1 vollständig zufrieden sind, bedeutet, dass sie nicht zufrieden sind. Ein QUESI-Gesamtwert von $M=3.7$ ($SD=0.8$) zeigt, dass die Teilnehmenden ziemlich zufrieden waren. Die Unterpunkte des QUESI-Werts sind subjektive mentale Arbeitsbelastung (W), wahrgenommene Zielerreichung (G), wahrgenommene Lernanstrengung (L), Vertrautheit (F) und wahrgenommene Fehlerquote (E). Der Wert $M=4.2$ ($SD=0.6$) für die wahrgenommene Zielerreichung zeigt, dass die Teilnehmer ihre Ziele erreichen konnten, während der Wert $M=3.4$ ($SD=0.7$) für die Vertrautheit zeigt, dass die Teilnehmer mit der Bedienoberfläche vertraut waren, es jedoch Raum für Verbesserungen gibt. Insgesamt zeigen die drei bewerteten Bewertungen, nämlich die Effektivität, die Effizienz und die Zufriedenheit, dass mit Hilfe des Designprozesses die Schnittstelle für das Wiedergabe-Programmiersystem verbessert wurde und von Nicht-Expertinnen und -Experten verwendet werden kann, die in Montage- und Konstruktionsbereichen arbeiten.

Abbildung 54*Ergebnisse der Evaluierung mit dem MINERIC Toolkit***5.6 Diskussion****5.6.1 Interpretation der Ergebnisse**

Das Ziel dieser Studie ist die Entwicklung eines Vorgehensmodells, dessen angewandte Methoden zu einer GUI für intuitive Roboterprogrammierung führt. Die Theorie zur intuitiven Nutzung von Benutzungsschnittstellen ist essenziell für die Wahl der Methoden im Prozess. Die Forschung der IUUI Gruppe basierend auf Gestaltungsprinzipien der DIN EN ISO 9241-110 (Mohs C. , et al., 2006) und die acht Prinzipien für intuitive Nutzung (McKay & Musgrave, 2018) führte zu den notwendigen Gestaltungsprinzipien, die bei der Entwicklung der GUI eingesetzt wurden. Um Informationen über Kenntnisse und Erfahrungen der Werkkräfte zu erhalten, die potenzielle Endanwendende sind, war eine quantitative Studie sehr aufschlussreich. Ebenso hätte eine qualitative Befragung weitere Informationen gebracht, da nur ein paar Optionen zur Auswahl standen. Allerdings ist das Programmiersystem einfach aufgebaut, wofür die gewählten Gestaltungselemente für die Endanwendenden zufriedenstellend und effizient waren, was die Intuitivität betrifft. Die Produktanalyse war als Methode hilfreich, da die Elemente der Textverarbeitungs-Software von den Testpersonen gut wiedererkannt und die Interaktion dadurch meist richtig interpretiert wurde.

In den Designphasen wurden die Prototypen Papierprototyp (Snyder, 2004) und virtuelles, interaktives Mockup angewandt, die stimmig im Prozess eingesetzt werden konnten. Während der Papierprototyp schnell und wirtschaftlich erstellt werden konnte, war es beim interaktiven Mockup wichtig, dass er möglichst realitätsnah getestet werden konnte. Das liegt daran, dass die Usability-Fachkräfte sich durch ihre Erfahrung auch mit Papierprototypen die Interaktion gut vorstellen und bewerten können. Die Methoden zur Evaluierung der GUI sind die Heuristische Evaluierung nach Nielsen (Nielsen & Molich, 1990) und der Nutzertest zur Bewertung der Intuitivität des Systems mit. Obwohl die abgefragten Punkte der Heuristischen Evaluierung nicht alle auf die intuitive Nutzung zutreffen, wurden sie aus Gründen der Fragebogen-Standardisierung so belassen. So sind Prinzipien zur Individualisierung nicht zwingend erforderlich, um ein System intuitiver zu machen.

Die Gestaltungsprinzipien, die beim interaktiven Mockup angewandt wurden, die sich aus der IUUI Forschung (Mohs C. , Hurtienne, Scholz, & Rotting, 2006) ergeben haben, und die acht Prinzipien für intuitive Nutzung waren gut in das GUI Design zu implementieren und haben auch zur Qualität des Designs ihren Beitrag geleistet. Ebenso wurden die Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge der Heuristischen Evaluierung in das interaktive Mockup integriert, bevor es von den Werkskräften getestet wurde. Damit konnte es in einer ersten Iteration bereits verbessert werden, bevor es den aufwändigen Nutzertest durchlaufen hat. Dieser Test wurde mit dem MINERIC Toolkit zur Evaluierung von intuitiven Robotersystemen (Orendt, Fichtner, & Henrich, 2017) durchgeführt. Die Methode war sehr ergiebig und passte sehr gut zum Anwendungskontext. Die Durchführung sollte besser zu zweit erfolgen, damit eine Person sich auf die Befragung der Teilnehmenden und die Demonstration des Systems konzentrieren und die andere Person auf das Notieren der Werte fokussieren kann.

Die bestehende technische Basis des Playback-Programmiersystems (Riedl & Henrich, 2019) zu verwenden ist sehr wichtig, weil dadurch das Design nah an der Implementierung ist und eine technische Umsetzung einfacher zu ermöglichen ist.

5.6.2 Limitationen

Die Methoden Produktanalyse und quantitative Befragung zu Programmierkenntnissen wurden vereinfacht durchgeführt, ohne Referenzen zu Standard-Methoden. Die heuristische Evaluierung wurde lediglich mit drei Personen durchgeführt, obwohl die Methode eine Personenzahl ab fünf empfiehlt. Die Heuristiken der Evaluierung entsprechen nicht genau den Gestaltungsprinzipien, die zur intuitiven Nutzung genannt werden. Wie in den anderen Studien, so wurden auch in dieser Studie die Methoden intuitiv gewählt, ohne weitere Methoden

anzuwenden, die miteinander verglichen werden könnten. Die Tatsache, dass für den Test zur intuitiven Nutzung kein realer Industrieroboter verwendet wurde, sondern ein skaliertes Modell mit simulierter Bewegung, kann einen Einfluss auf den Test gehabt haben und damit auch auf die Bewertung der Teilnehmenden. Das könnte erst geprüft werden, wenn die gleiche GUI in die Software implementiert und mit der gleichen Methode getestet werden würde.

6 Ganzheitlicher Ansatz: Nutzerzentrierte Gestaltung einer GUI für die mobile MRK

6.1 Ausgangssituation und Ziel

In den drei beschriebenen Studien wurde die GUI für mobile MRK anhand der drei Konstrukte Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung entwickelt. Die Konstrukte bestehen im Prozess jeweils aus den Phasen Analyse, Gestaltung und Evaluierung. Da sich die Phasen wiederholen, können sie als iterativ bezeichnet werden. Allerdings werden in jeder Iteration bestimmte Methoden angewandt, die sich nicht wiederholen. Die Methoden bringen das Design Stück für Stück im Prozess voran. In den vorhergehenden Kapiteln sind die Methoden und Ergebnisse teilweise unabhängig vom Ablauf betrachtet worden. Der Ablauf ist jedoch essenziell, da die Konstrukte nicht sequentiell im Prozess angewandt werden können. Der Ablauf der drei einzelnen Konstrukte wird im Folgenden erläutert.

6.2 Prozessmodell für Situationsbewusstsein

Das Vorgehen, um eine GUI für Situationsbewusstsein in der mobilen MRK zu gestalten, ist in der Abfolge eingeteilt in Analyse, Gestaltung und Evaluierung. Die Analysephase besteht aus einer Goal-Directed Task Analysis und einem Physical Model. Die Gestaltungsphase enthält das Wireframe Design. Die Evaluierung wird als qualitatives Interview und als quantitative Studie, angelehnt an SAGAT, durchgeführt. Grundsätzlich können die ersten Methoden sequenziell durchgeführt werden. Bei der letzten Methode, der quantitativen Studie, kann das Wireframe jedoch nicht zur Messung von Situationsbewusstsein dienen. Das Wireframe zeigt relevante Informationen auf, um die Arbeitsaufgabe durchzuführen. Es ist jedoch nicht interaktiv, sondern lediglich auf einen visuellen Informationsaustausch ausgelegt. Um ein interaktives GUI umzusetzen, muss entschieden werden, wie die Interaktion erfolgen soll. Dies findet in einer anderen Phase des Prozesses statt, weil hierfür Gestaltungsprinzipien zur Mensch-System-Interaktion angewandt werden sollten, die im Konstrukt Gebrauchstauglichkeit beinhaltet sind.

Demnach ist die Empfehlung eines Vorgehens zur Entwicklung der GUI für Situationsbewusstseins folgende: beginnen sollte sie mit der Goal-Directed Task Analysis, bestehend aus einer teilnehmenden Beobachtung, Interviews mit Montagepersonal und der Erstellung und Validierung von Zielhierarchien. Danach sollte ein Physical Model erstellt werden, als Überleitung von der Goal-Directed Task Analysis zum Wireframe Design. Das Wireframe Design sollte nach Gestaltungsprinzipien für Situationsbewusstsein entwickelt

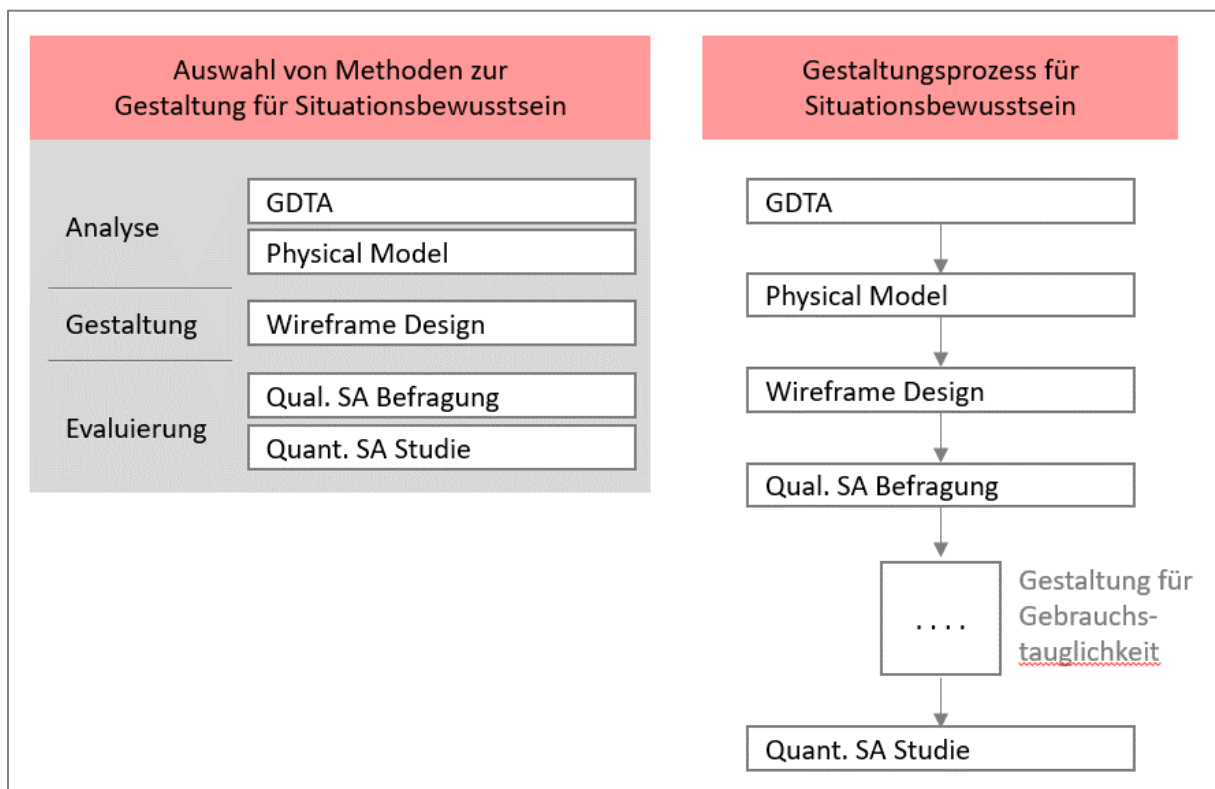
werden. Danach erfolgt eine qualitative Evaluierung, um ein frühes Feedback bzgl. der Positionierung und Gestaltung von Informationen am Display zu erhalten. Die Evaluierung der GUI hinsichtlich Situationsbewusstseins sagt über die GUI aus, ob Informationen verständlich und hilfreich sind, damit sie zu hohem Situationsbewusstsein verhelfen.

Bevor die GUI mittels Evaluierung für Situationsbewusstsein bewertet werden kann, muss allerdings die Entwicklung eines interaktiven Mockups erfolgen. Das interaktive Mockup beinhaltet Bedienelemente zum Gebrauch der GUI, die die Eingabemodalität und die Rückmeldung des Systems definieren. Das führt dazu, dass die Methoden für Situationsbewusstsein nicht aufeinanderfolgend angewandt werden, sondern sich mit den Methoden für Gebrauchstauglichkeit überschneiden.

Abbildung 55 stellt den Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für Situationsbewusstsein dar.

Abbildung 55

Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für Situationsbewusstsein



Anmerkung. Zur Vereinfachung der Begriffe wurde die qualitative Befragung zum Situationsbewusstsein als *Qual. SA Befragung* bezeichnet und die quantitative Studie zur Messung des Situationsbewusstseins wurde als *Quant. SA Studie* bezeichnet.

6.3 Prozessmodell für Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit wurde in dieser Studie wieder in die Phasen Analyse, Gestaltung und Evaluation eingeteilt. Die Analysephase wurde mit Methoden der Nutzeranalyse durchgeführt, bei der als erstes eine quantitative Studie durchgeführt wird, um bekannte und gewünschte Eingabemodalitäten der potenziellen Nutzenden zu identifizieren. Die bevorzugte Modalität, die sich in diesem Fall als Touchbedienung herausgestellt hat, wurde darauf in qualitativen Interviews näher untersucht, um die Erfahrung und Einstellung zur Touchbedienung der Teilnehmenden herauszufinden.

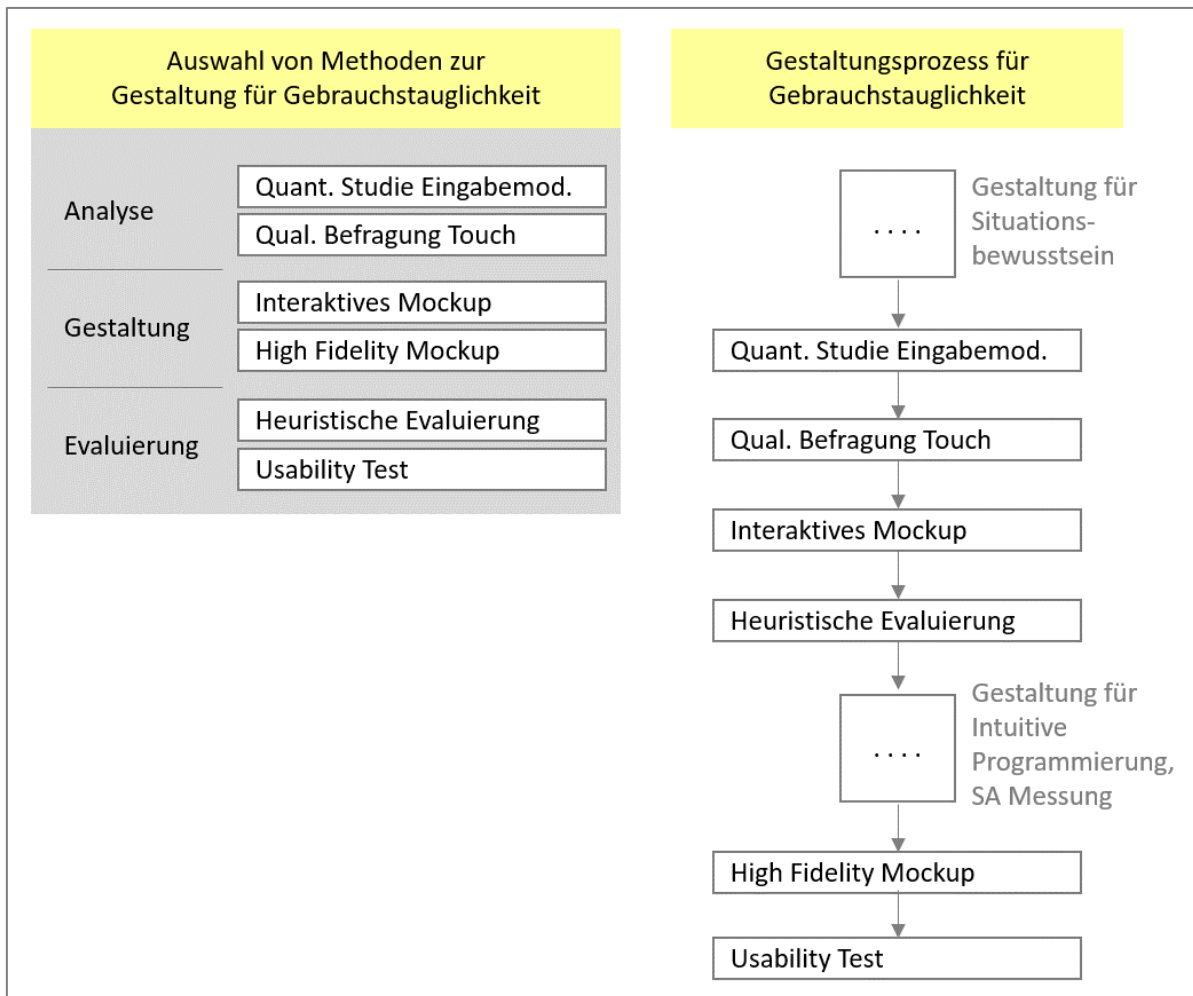
Die Erkenntnisse sind in die Gestaltung der GUI mit eingeflossen. Da das Touch-Interface die bevorzugte Eingabemodalität des Montagepersonals ist, ist das interaktive Mockup mit Bedienelementen ausgestattet, die groß genug für die Bedienung mit dem Finger sind.

In das interaktive Mockup werden Gestaltungsprinzipien der Norm für Gebrauchstauglichkeit implementiert, sowie die Inhalte des Wireframe Designs als Grundgerüst. Das Feedback der Teilnehmenden aus den qualitativen Interviews für Situationsbewusstsein wird darin ebenso eingearbeitet.

Nach Entwicklung des interaktiven Mockups wird es mit Hilfe einer Heuristischen Evaluierung nach Nielsen von Usability-Fachkräften bewertet. Bereits zu diesem Stand könnte die GUI mit Endnutzenden in einem Usability Test evaluiert werden. Es bringt allerdings mehr Nutzen, wenn in das Mockup die Erkenntnisse der Heuristischen Evaluierung und der Situationsbewusstseins-Messung bereits implementiert werden. Um den aufwendigen Usability Test später nicht noch einmal durchführen zu müssen, sollte auch die Funktion der intuitiven Roboterprogrammierung bereits in die GUI inkludiert sein. Dazu muss es vorher in einem Prozess erarbeitet werden, der in Studie 3 untersucht wurde. Abbildung 56 stellt den Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für Gebrauchstauglichkeit dar.

Abbildung 56

Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für Gebrauchstauglichkeit



Anmerkung. Die quantitative Studie für Eingabemodalitäten wurde mit *Quant. Studie Eingabemod.* abgekürzt, die qualitative Befragung zu Touch-Interfaces wurde mit *Qual. Befragung Touch* abgekürzt.

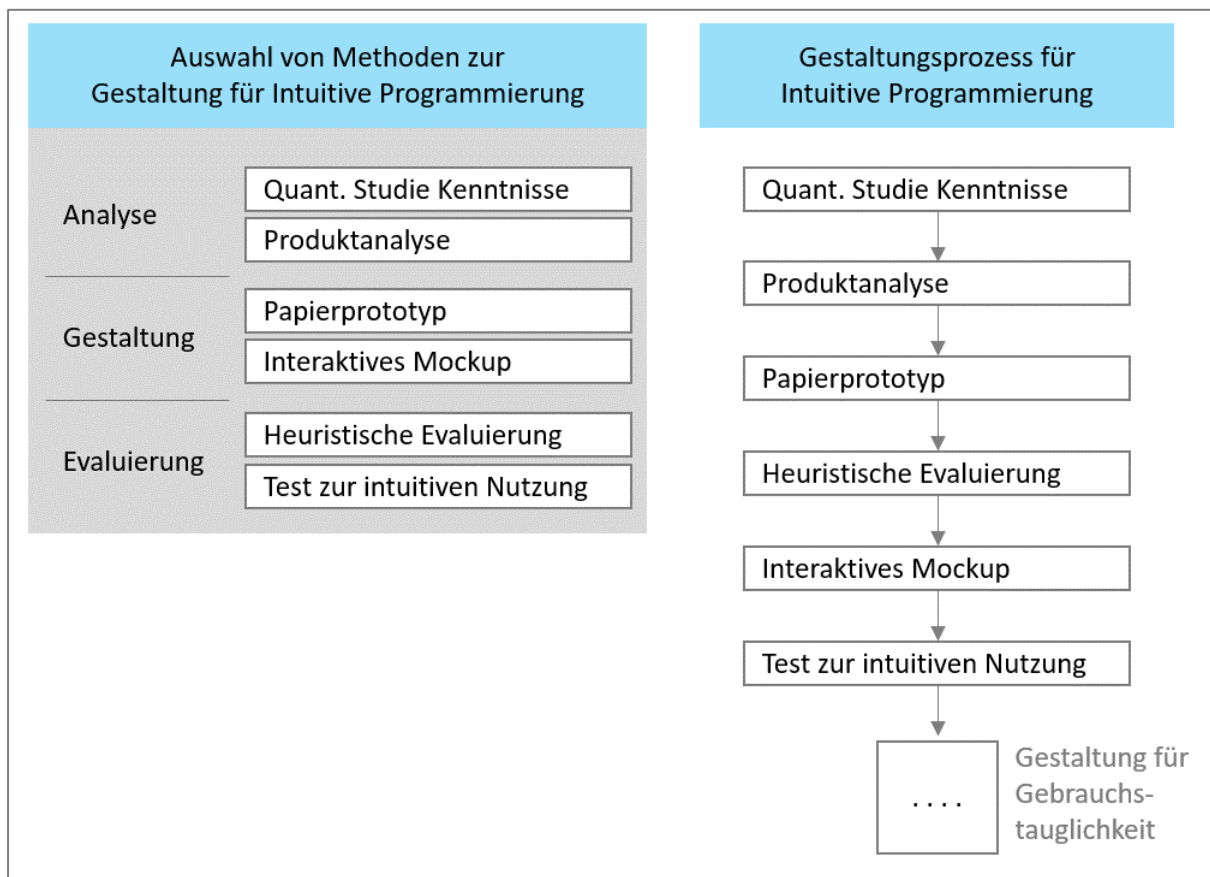
6.4 Prozessmodell für intuitive Nutzung

Der Prozess zur intuitiven Roboterprogrammierung, bei der Gesetzmäßigkeiten der intuitiven Nutzung angewandt werden, teilt sich wieder in die Phasen Analyse, Gestaltung und Evaluierung ein. Die Gestaltungs- und Evaluierungsphase wird dabei zweimal durchgeführt. In der Analysephase wird eine quantitative Befragung durchgeführt, um zu ermitteln, welche Software zum Editieren für das Montagepersonal bekannt ist und wie gut grundlegende Kenntnisse zur Roboterprogrammierung sind. Als nächstes wird, bezogen auf bekannte Editiersoftware (Videoschnitt, Audioschnitt, Textbearbeitung usw.), eine Produktrecherche durchgeführt, um zu analysieren, wie die Software-Systeme zum Editieren gestaltet sind und

wie die Interaktion mit ihnen erfolgt. Um einen frühen, interaktiven Prototypen schnell und wirtschaftlich zu erstellen, wird ein Papierprototyp generiert. Darin sind die Erkenntnisse aus der Analysephase und Gestaltungsprinzipien für intuitive Nutzung implementiert. Mit Hilfe des Papier-Prototyps wird anschließend eine Heuristische Evaluierung mit Usability Experten durchgeführt. Darauf folgt eine weitere Gestaltungsiteration, in der ein virtuelles, interaktives Mockup umgesetzt wird. Der interaktive Prototyp enthält die Erkenntnisse aus der Heuristischen Evaluierung und weitere Gestaltungsprinzipien, die Bedienelemente der GUI intuitiv bedienbar machen, z.B. welche Flächen interaktiv sind und welche als nächstes gedrückt werden sollten. Abschließend wird ein Test zur interaktiven Nutzung mittels MINERIC Toolkit durchgeführt, um an potenziellen Endnutzenden die Intuitivität der Roboterprogrammierung zu evaluieren. Abbildung 57 stellt den Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für intuitive Roboterprogrammierung dar.

Abbildung 57

Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess zur intuitiven Roboterprogrammierung



Anmerkung. Die quantitative Studie zu Programmierkenntnissen und Kenntnissen über Editiersoftware wird mit *Quant. Studie Kenntnisse* abgekürzt.

6.5 Ganzheitlicher Prozess für nutzerzentrierte Gestaltung

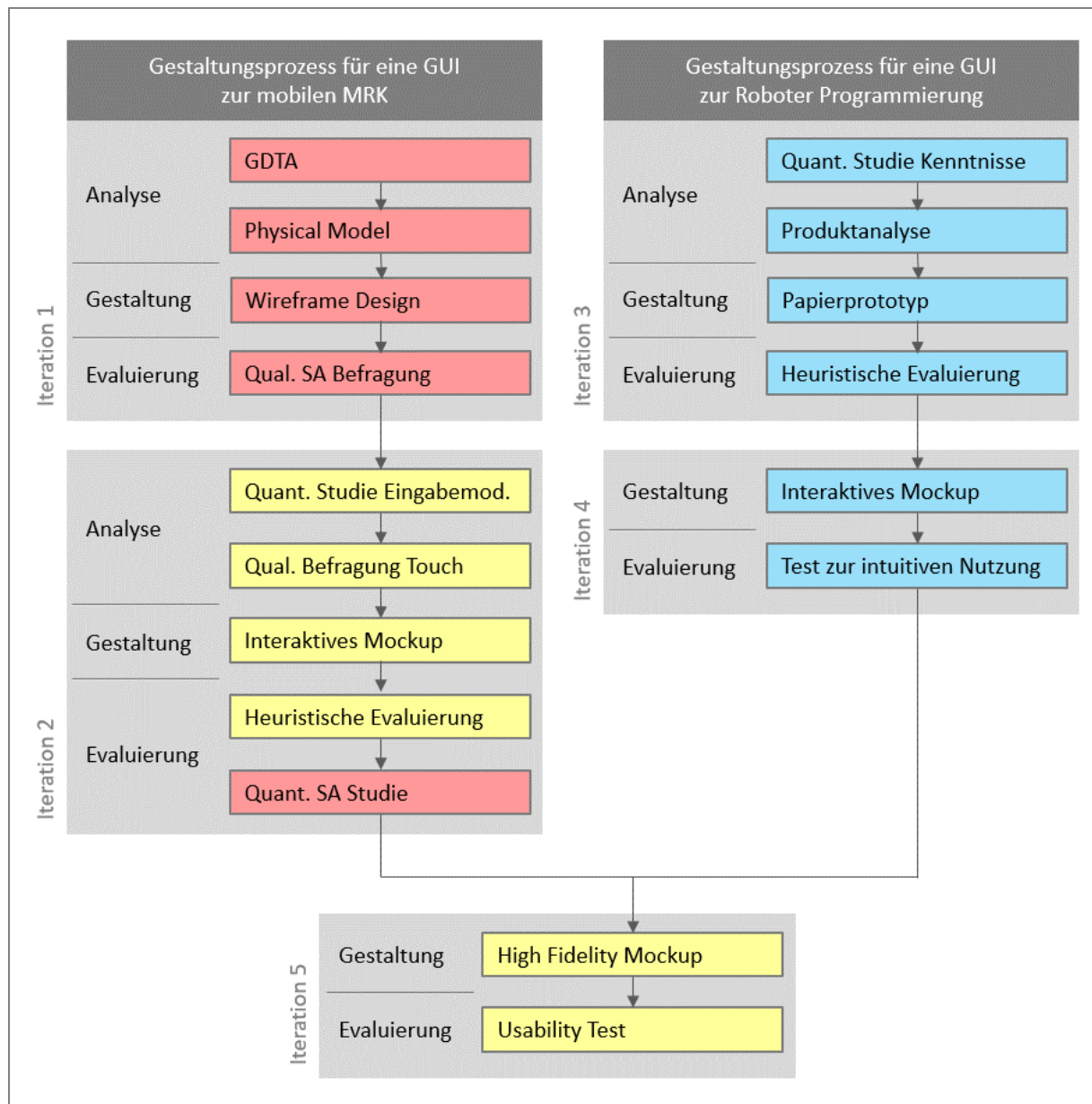
Aus den eben beschriebenen Vorgehensweisen, um zu einem nutzerzentrierten GUI für die mobile MRK zu gelangen, lässt sich ein ganzheitlicher Prozess ableiten. Das Vorgehen ist dabei nicht trennscharf eingeteilt in die drei Konstrukte. Es startet mit den zwei parallel verlaufenden Abläufen von Situationsbewusstsein und Intuitive Nutzung, bei denen es keine Rolle spielt, welcher der beiden Abläufe zuerst durchgeführt wird. Der Prozess zur Gestaltung für Situationsbewusstsein startet mit einer Aufgabenanalyse, der Goal-Directed Task Analysis, um relevante Informationen für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe bei der mobilen MRK zu identifizieren. Der Prozess zur Gestaltung der GUI für eine intuitive Roboterprogrammierung startet mit einer quantitativen Befragung zur Anwendung von Editier-Software.

Die GUI-Gestaltung für die mobile MRK behandelt die Konstrukte Situationsbewusstsein und Gebrauchstauglichkeit. Sie schließt mit der Evaluierungsphase ab, in der die Gebrauchstauglichkeit von Usability-Experten und das Situationsbewusstsein von potenziellen Endnutzenden bewertet wird.

Beide Abläufe münden in eine Gestaltungsphase für ein High Fidelity Mockup, das die gesammelten vorangegangenen Erkenntnisse enthält und in einer abschließenden Evaluation mit Montagepersonal durchgeführt werden kann. Bei der Evaluation ergeben sich durch den Fragebogen ISONORM 9241/110 Messwerte, die erkennen lassen, ob die GUI eine zufriedenstellende Qualität hinsichtlich Nutzerzentriertheit erreicht hat. Ebenso wird das Feedback der Teilnehmenden eingeholt, was man bei der GUI-Gestaltung noch verbessern könnte. Das Feedback kann bei der Gestaltung eines weiteren Mockups erneut berücksichtigt und implementiert werden. Ebenso kann eine weitere quantitative Evaluation zur Messung von Situationsbewusstsein oder eine Messung der Intuitivität bei der Roboterprogrammierung durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise wäre dann tatsächlich iterativ, denn die bereits durchgeführten Abläufe würden mit gleicher Methodik erneut ausgeführt werden. Bezogen auf die jeweilige Anwendung und ihrem Ziel, das erreicht werden soll, kann die Methodik in beliebig vielen Iterationen wiederholt werden, bis die gewünschte Gestaltungsqualität erreicht ist. In dieser Arbeit werden die Methoden lediglich einmal im Prozess aufgezeigt, weil das Ziel der Arbeit die Gestaltung des Prozesses selbst ist. Abbildung 58 stellt einen Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für die mobile MRK mit Fokus auf Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Roboterprogrammierung dar.

Abbildung 58

Ansatz für einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess für die mobile MRK mit Fokus auf Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Roboterprogrammierung



7 Gesamtdiskussion und Schlussfolgerung

7.1 Gesamtdiskussion

Ziel dieser Dissertationsschrift ist es, einen nutzerzentrierten Gestaltungsprozess zu entwickeln, im Kontext mobiler MRK für Montagearbeitsplätze. Dabei werden die drei Konstrukte Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung fokussiert und in den Prozess integriert. Um den gesamten Kontext zu erfassen ist zum einen notwendig, Prinzipien aus Betriebswissenschaften bzw. spezifisch aus der Montage, aus der Arbeitswissenschaft und aus dem UX-Design zu benennen und auf die mobile MRK-Anwendung zu übertragen. Ebenso ist es wichtig, disziplinenübergreifende Facetten der nutzerzentrierten Prozesse zu identifizieren und sie in die Praxis zu überführen. Eine Erfassung der gesamten Thematik und ihrer Zusammenhänge ist in Abbildung 59 dargestellt. Im Folgenden werden der theoretische Rahmen für die mobile MRK, die nutzerzentrierte Gestaltung sowie die Ergebnisse der Studien diskutiert und die Forschungsfragen beantwortet. Abschließend werden Limitationen dieser Arbeit aufgezeigt.

7.1.1 Diskussion des theoretischen Rahmens für mobile MRK

Die Bildung eines theoretischen Rahmens mit Prinzipien aus verschiedenen Disziplinen ist essenziell, um anerkannte Theorien und Fachtermini zu erfassen und in einen gemeinsamen Kontext zu bringen. Wichtig ist dabei, sorgfältig die relevanten Elemente aus Taxonomien und bestehenden Systemen zu extrahieren, um sie auf den gegebenen Anwendungsfall zu übertragen.

In der vorliegenden Arbeit handelt es sich beim Roboter um eine Baugruppe, die aus den drei Hauptkomponenten *mobile Plattform*, *Roboterarm* und *Endeffektor* besteht. Durch die Klassifizierung nach ECLASS (ECLASS e.V., 2023) lassen sich die Komponenten grundsätzlich gut eingruppiert, so dass verschiedene Robotertypen und verschiedene Endeffektoren benannt werden können. Bei der mobilen Plattform ist auffällig, dass es keine klare Spezifikation gibt, wenn sich der Plattfortmtyp ändern würde. Die mobile Plattform wird als Klasse 27-38-01-90 *Roboter (nicht spezifiziert)* bezeichnet, unabhängig ob es ein fahrender Roboter oder ein vierbeiniger Laufroboter ist. Die Verwendung von ECLASS für die Klassifizierung des Roboters ist trotzdem sinnvoll, da ersichtlich gemacht werden kann, welche Möglichkeiten der Robotertechnologie offenstehen. Es kann eine schlüssige Verbindung zwischen Roboterelementen und Fähigkeiten in der Montage hergestellt werden (Hammerstingl & Reinhart, 2017), da es sich bei den Fähigkeiten um standardisierte Eigenschaften in der

Fertigung handelt und das System auf andere Anwendungsfälle übertragbar ist. Die Kombination von Roboter-elementen und Fähigkeiten resultiert in eine Aufgabenallokation, die für die Arbeitsaufgabe gebildet wird. Das bedeutet, dass der Roboter zum Transportieren und Einsetzen der Servomotoren eingesetzt wird, weil er durch die Ausstattung mit mobiler Plattform, Roboterarm und Greifer die Fähigkeit zum Transportieren und für Pick & Place Aufgaben erwirbt.

Die Taxonomie für Mensch-Roboter-Interaktion (Onnasch, Maier, & Jürgensohn, 2016) bildet eine Reihe von hilfreichen Parametern, um die vorhandene MRK-Anwendung zu definieren, jedoch sind einige der Faktoren irrelevant, z.B. ob die Morphologie des Roboters humanoid, zoomorph oder funktional ist. Die Interaktionsformen (Schmid & Maier, 2017) hingegen definieren den Roboter als mobile Einheit, im Vergleich zu einem immobilen Roboter. Somit spielt es auch hier keine Rolle, ob der Roboter funktional, zoomorph oder humanoid ist. Bezogen auf die Interaktionsformen und die Varianten der Roboter-gestalt wurde eine Gruppierung der vorliegenden Anwendung auf Basis der vier vorgegebenen Parameter Mobilität, Variabilitätsgrad, Gestalttyp und Koordinatensystem vorgenommen (Schmid & Maier, 2017). Die Anwendung wurde als *mobiler* Roboter mit *Außengestalt* und *variabler, separierter* GUI definiert, um sich z.B. von einem *mobilen* Roboter mit *Innengestalt* und *fixierter, integrierter* GUI abzugrenzen, in den der Mensch einsteigen und ihn mittels befestigter GUI teleoperieren würde (siehe Kap. 2.1.4, Abb. 9).

Die Abstraktion des Anwendungs-falls auf ein Arbeitssystem hat Erkenntnisse bzgl. der Anwendung bestimmter Sinnesmodalitäten für die Mensch-Roboter-Interaktion erbracht. Diese Erkenntnisse wurden vorab in der Arbeitssystemanalyse (Leichtmann, Schnös, Rinck, Zäh, & Nitsch, 2018) identifiziert und zur Gesamtheit von Interaktionsmöglichkeiten hinzugefügt, um die Benutzungsschnittstelle näher definieren zu können. Als Ergänzung zum Arbeitssystem ist die Benennung der Montageform unterstützend, bei der es sich in diesem Fall um eine Baustellenmontage, als Teilgebiet der manuellen Montage von Großgeräten, handelt (Lotter & Wiendahl, 2013). Mit dieser Spezifizierung grenzt man sich von anderen Montageformen ab, wie z.B. der manuellen Montage von Kleingeräten, der Fließbandmontage und von automatischen Montagesystemen, die zu einem anderen Arbeitssystem und damit zu anderen Anforderungen an eine nutzerzentrierte Gestaltung führen würden.

7.1.2 Diskussion des theoretischen Rahmens für eine nutzerzentrierte Gestaltung

Die Recherche zur nutzerzentrierten Gestaltung hat verschiedene Ansätze identifiziert, wie z.B. für Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit, intuitive Nutzung und Contextual Design.

Auch weitere Konstrukte, die sich auf nutzerzentrierte Gestaltung beziehen, wie z.B. Design Thinking, sind grundsätzlich vom Prozess her ähnlich aufgebaut (König, 2012).

Bei der Verknüpfung von Theorie und Praxis in Bezug auf Gestaltungsprozesse hat sich gezeigt, dass das Vorgehen iterativ sein sollte und die Gliederung in Analyse, Gestaltung und Evaluation sich in allen Studien als gültig erwiesen hat. Die wichtigsten Konstrukte sind dabei Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung. Beim direkten Vergleich der drei Konstrukte sind Überschneidungen zu finden. Dies führt jedoch nicht dazu, dass man die drei Begriffe synonym betrachten kann. Jedes Konstrukt beinhaltet seine eigenen Methoden und Begrifflichkeiten. Die Begriffe *Situationsbewusstsein* und *intuitiv* werden z.B. in Normen für Gebrauchstauglichkeit (z.B. DIN EN ISO 9241-110) nicht erwähnt (Deutsches Institut für Normung eV., 2020). Eine der wenigen Gegenüberstellungen ist bei den Abstufungen für intuitive Nutzung zu finden, bei denen die Intuitivität der Bedienbarkeit übergeordnet ist (McKay & Musgrave, 2018). So lassen sich zwar Konzepte für Gestaltungsansätze vergleichen und gegenüberstellen (siehe Kap. 2.5), die Überschneidungen der Themen sind jedoch grundsätzlich unerforscht.

Der Ansatz *Research through Design* ist hilfreich, um verschiedene Konstrukte zusammenzufassen und Methoden miteinander zu kombinieren (Frayling, 1993; Jonas, 2007). So wurde die Methode *Physical Model* aus dem *Contextual Design* Prozess zum Gestaltungsprozess für Situationsbewusstsein hinzugefügt, um das Vorgehen zu optimieren.

Die Praxis wurde anhand von drei Studien erforscht und evaluiert. Die erste Studie behandelt das Situationsbewusstsein für die mobile MRK, die zweite Studie behandelt die Gebrauchstauglichkeit der GUI und die dritte Studie thematisiert die intuitive Roboterprogrammierung. Die Vorgehensmodelle der drei Studien wurden zu einem Prozess kombiniert, der die nutzerzentrierte Gestaltung für die mobile MRK ganzheitlich aufzeigt. Die Ergebnisse der Evaluierungen aller drei Konstrukte zeigen gute Werte auf. Dies lässt darauf schließen, dass die Methoden passend für den Anwendungsfall sind.

Es besteht die Möglichkeit, den Gestaltungsprozess modular anzuwenden. Für den gesamten Anwendungsfall aus mobiler Robotik, interaktiver GUI und Roboterprogrammierung ist der gesamte Prozess aus drei Konstrukten relevant. Entfällt eine der Anforderungen, sind auch nicht mehr alle Konstrukte relevant. Bei Entfall der Mobilität des Roboters, ist das Situationsbewusstsein nicht mehr relevant, weil das System nicht mehr dynamisch ist. Entfällt die Interaktion mit der GUI, so dass das Display rein informative Informationen enthält, ist das Konstrukt Gebrauchstauglichkeit nicht mehr relevant. Entfällt die Funktion der

Roboterprogrammierung, so muss der Prozess zur intuitiven Nutzung nicht mehr in Betracht gezogen werden.

7.1.3 Interpretation der Ergebnisse zu Situationsbewusstsein für die mobile MRK

Die erste Studie untersucht relevante Informationen, die die GUI präsentieren sollten. Die Informationen sollen dabei das Situationsbewusstsein der Endnutzenden unterstützen. Als Methode zur Aufgabenanalyse wurde dabei die GDTA gewählt. Obwohl es weitere Methoden für die Aufgabenanalyse gibt, ist die GDTA speziell für das Konstrukt Situationsbewusstsein entwickelt worden und wird auch in diversen anderen Arbeiten angewandt (Sharma, Nazir, & Ernstsen, 2019; Taylor, et al., 2018; Adams, 2006; Scholtz J. , 2002). Diese Analysemethode enthält das Prinzip der 3 Ebenen (Wahrnehmung, Verständnis, Projektion), die sich auch bei den Gestaltungsprinzipien und Evaluierungsmethoden für Situationsbewusstsein wiederfinden.

Das Physical Model wurde aus dem Designprozess für Contextual Design (Holtzblatt & Beyer, 2017) entnommen und nach der GDTA als Zwischenschritt zur Gestaltung des Wireframe-Prototyps eingesetzt. Auch wenn die Methode keine neuen Erkenntnisse bzgl. Analysedaten liefert, ist es eine hilfreiche Stütze, um von textlichen zu darstellerischen Ergebnissen zu gelangen. Dies konnte auch in einer Validierung mit zehn Studierenden so bestätigt werden (siehe Kap.3.6.2).

Für die Entwicklung des Wireframe-Designs wurden Gestaltungsprinzipien für Situationsbewusstsein angewandt (Endsley, Bolté, & Jones, 2003), wobei lediglich die acht Hauptprinzipien angewandt wurden statt den insgesamt 44 Prinzipien, um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen. Ebenso wurden die Prinzipien der *HRI-Awareness* (Scholtz J. , 2002) angewandt, die jedoch für das GUI-Design nur die Empfehlung enthalten, sowohl das Gesamtziel (in diesem Fall die Montageaufgabe) als auch den Roboterstatus zu berücksichtigen. Bei der Validierung mit Studierenden wurde dieses Prinzip als nicht besonders hilfreich empfunden.

Die qualitative Evaluierung des Wireframes mit zwölf Werkskräften hat gute Ergebnisse erbracht, auch wenn das Wireframe lediglich Informationen über Arbeitsaufgabe und Roboter, ohne Möglichkeiten zur Interaktion, angezeigt hat. Es ist eine hilfreiche Methode, die neue Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge für eine weitere Iteration des GUI-Designs liefert. Die quantitative Studie zur Messung des Situationsbewusstseins, die angelehnt ist an SAGAT (Endsley M. R., 1988), konnte erst angewandt werden, nachdem die GUI für Gebrauchstauglichkeit entwickelt wurde. Es war vorher notwendig, auf Basis von

Gestaltungsempfehlungen und durch die Definition von Eingabemodalitäten die Interaktionsprinzipien in das Interface zu implementieren. Die quantitative Studie, die mit 20 Werkkräften durchgeführt wurde, zeigte sehr gute und valide Ergebnisse bezüglich des Situationsbewusstseins.

7.1.4 Interpretation der Ergebnisse zu Gebrauchstauglichkeit für die mobile MRK

Die zweite Studie entwickelt den vorhergehenden Prozess weiter, um aus dem Wireframe eine gebrauchstaugliche GUI in Form eines interaktiven Mockups prototypisch umzusetzen. Der Gestaltungsprozess, eingeteilt in Analyse, Gestaltung und Evaluierung, erfasst Daten über die potenziellen Nutzenden zu Kenntnissen und Eignung der Eingabemodalitäten bzgl. der GUI. Es hat sich herausgestellt, dass die Teilnehmenden Touchscreens bevorzugen, obwohl manchmal Handschuhe bei der Montage verwendet werden. Da fast alle befragten Personen ein Smartphone besitzen und auch im Alltag immer wieder mit Touchsystemen in Kontakt kommen (z.B. Navigationsgerät, Geldautomat), ist es für sie eine bekannte Eingabeform, die sie sich auch bei der MRK-Anwendung wünschen. Damit geht eine GUI-Gestaltung für Touchsysteme in die richtige Richtung. Diese Analyse von Nutzenden wird für gewöhnlich in der MRK-Entwicklung nicht durchgeführt, weil sie meist Methoden aus der qualitativen Forschung enthält, die für gewöhnlich in der Sozialwissenschaft gängig sind.

Bei der Gestaltung des interaktiven Mockups wurde die DIN EN ISO 9241 mit den Teilen 110, 112 und 13 angewandt (Deutsches Institut für Normung eV., 2020; Deutsches Institut für Normung eV., 2017; Deutsches Institut für Normung eV., 1998). Meist wird im GUI-Design nur Teil 110 der Norm angewandt, wie z.B. bei der Entwicklung eines Service-Roboters für den Baumarkt (Poeschl, Doering, Boehme, & Martin, 2009). Es wird für gewöhnlich auch nicht aufgezeigt, wie die Gestaltungsprinzipien in die GUI implementiert werden. Dies hat die Studie näher untersucht und die Erkenntnis erbracht, dass gewisse Gestaltungsprinzipien der Normen zu redundanten Ergebnissen führen. So führen die Prinzipien *Erwartungskonformität* aus Teil 110, *Eindeutige Interpretierbarkeit* aus Teil 112 und *Allgemeine Empfehlungen zur Benutzerführung* aus Teil 13 dazu, vertrautes Vokabular in der GUI zu verwenden.

Das High-Fidelity Mockup, das alle anderen Erkenntnisse beinhaltet, ist eine passende Grundlage, um valide Usability-Tests mit Werkkräften durchzuführen und valide Auswertungen zu erhalten, wie gebrauchstauglich das System ist. Mit diesem Mockup wäre auch eine erneute Messung von Situationsbewusstsein oder Intuitivität möglich, die jedoch nicht mehr durchgeführt wurde, weil nicht zu erwarten war, dass sie neue methodische Erkenntnisse erbracht hätte.

Die heuristische Evaluation nach Nielsen (Nielsen & Molich, 1990) war sehr erkenntnisreich, denn es wurden prägnante Verbesserungsvorschläge in kurzer Zeit (ca. eine Stunde pro Sitzung) durch fünf Usability-Fachkräfte aufgezeigt.

Der Usability-Test war in diesem Kontext passend, denn er hat genau die Prinzipien abgefragt, die bei der GUI-Gestaltung implementiert wurden. Hier war es notwendig, den Fragebogen ISONORM 9241/110 zu verwenden. Denn auch wenn er nicht die aktuellen Gestaltungsprinzipien der DIN EN ISO 9241-110 (Stand 2020) abfragt, so gibt es bisher (Stand Oktober 2023) keinen aktuelleren ISONORM Fragebogen. Der Fragebogen *System Usability Scale* fragt z.B. nicht exakt die Gestaltungsprinzipien der Norm ab.

7.1.5 Interpretation der Ergebnisse zur intuitiven Roboterprogrammierung

Die dritte Studie hat die Entwicklung eines Vorgehensmodells zum Ziel, um den Roboter spontan und intuitiv von Montagepersonen programmieren zu können. Das wurde auf Basis der Theorie für intuitive Nutzung in zwei Iterationen durchgeführt, in den die potenziellen Nutzenden nach Kenntnissen zu Programmieren und Editiersysteme zur Textverarbeitung, Video- und Audibearbeitung befragt. Es wurde ein Papierprototyp der GUI entwickelt und mit Usability-Experten inspiziert, sowie ein interaktives Mockup mit Endnutzenden evaluiert.

Ziel der dritten Studie ist die Entwicklung eines Prozesses für intuitive Roboterprogrammierung, damit Werkkräfte bei der MRK an Montagearbeitsplätzen dem Roboter spontan und intuitiv ohne besondere Programmierkenntnisse neue Arbeitsaufgaben einprogrammieren können. Dazu wird zunächst eine quantitative Befragung der Werkkräfte zu Kenntnissen über Programmierung und Editiersysteme durchgeführt. Es hat sich ergeben, dass viele Teilnehmende keine grundlegenden Programmierkenntnisse besitzen. Auch zu Editiersystemen ist lediglich Wissen über Textverarbeitungsprogramme vorhanden, weniger bzgl. Video- oder Audibearbeitung. Anschließend wird durch die Forschenden eine Produktanalyse durchgeführt, um verschiedene Softwaresysteme bzgl. ihrer Interaktion zu untersuchen und bei der GUI für Roboterprogrammierung eine Konsistenz zu schaffen, damit die GUI auch intuitiv bedienbar wird.

Der erzeugte Papierprototyp (Snyder, 2004) ist eine gute Methode, um schnelle Design-Ergebnisse zu erhalten, die mit Usability-Fachkräften gut evaluierbar sind. Für eine Evaluierung mit Werkkräften ist es vermutlich ungeeignet, da es noch zu weit weg von einem implementierten Interface ist. Das interaktive virtuelle Mockup hingegen ist ein definierter Prototyp, der für die Evaluierung mit Endnutzenden gut geeignet ist. Er muss auch nicht in das

Robotersystem implementiert werden, das macht ihn wirtschaftlich. Spätestens hier ist es wichtig, Gestaltungsempfehlungen für intuitive Nutzung zu integrieren, falls es beim Papierprototypen noch nicht umgesetzt wurde.

Die heuristische Evaluierung nach Nielsen ist, wie schon beim interaktiven Mockup für die mobile MRK, schnell und einfach durchzuführen. Sie führt zu guten Erkenntnissen, da die Usability-Fachkräfte ihre Vorschläge direkt auf die GUI beziehen. Für die Evaluierung der intuitiven Nutzung wäre es vermutlich sinniger, nach Prinzipien für intuitive Nutzung (McKay & Musgrave, 2018) zu fragen statt nach den Nielsen-Heuristiken (Nielsen & Molich, 1990). Jedoch gibt es für intuitive Nutzung bisher keinen standardisierten Fragebogen für Expert Reviews. Für den Test zur intuitiven Nutzung, der mit Endnutzenden durchgeführt wurde, war das MINERIC Toolkit (Orendt, Fichtner, & Henrich, 2017) eine geeignete Methodensammlung, die zu aussagekräftigen Ergebnissen und unterstützenden Erkenntnissen geführt hat.

7.1.6 Beantwortung der Forschungsfragen

Die erste Forschungsfrage **Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI gestaltet werden, die das Situationsbewusstsein in der MRK bestmöglich unterstützt?** kann wie folgt beantwortet werden: Es werden die drei Prozessphasen Analyse, Gestaltung und Evaluierung durchgeführt. In der Analysephase wird eine GDTA durchgeführt und ein Physical Model erstellt. In der Gestaltungsphase wird ein Wireframe Design mit Gestaltungsprinzipien für Situationsbewusstsein entwickelt. In der Evaluierungsphase wird eine quantitative Befragung für Situationsbewusstsein mit Endnutzenden durchgeführt. Erst nachdem die GUI für Gebrauchstauglichkeit entwickelt wurde, kann abschließend eine quantitative Studie zur Messung von Situationsbewusstsein mit Endnutzenden erfolgen. Die genaue Beschreibung Gestaltungsprozesses für Situationsbewusstsein ist in Abschnitt 6.2 zu finden.

Die zweite Forschungsfrage **Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI für eine gebrauchstaugliche MRK gestaltet werden?** wird folgendermaßen beantwortet: Es werden zwei Iterationen durchgeführt, mit den Prozessphasen Analyse, Gestaltung und Evaluierung in der ersten Iteration und den Phasen Gestaltung und Evaluation in der zweiten. Die Analysephase beinhaltet eine quantitative Studie bzgl. Eingabemodalitäten und eine qualitative Befragung zur favorisierten Eingabemodalität, jeweils mit Endnutzenden. In der ersten Gestaltungsphase wird ein interaktives Mockup mit Gestaltungsprinzipien für Gebrauchstauglichkeit entwickelt. In der ersten Evaluierungsphase wird das interaktive Mockup in einer heuristischen Evaluierung inspiziert. In der zweiten Gestaltungsphase werden

alle bisher gewonnenen Erkenntnisse in einem High Fidelity Mockup implementiert. Abschließend wird es in der zweiten Evaluierungsphase in einem Usability Test mit Endnutzenden geprüft. Die detaillierte Beschreibung und Darstellung des Gestaltungsprozesses für Gebrauchstauglichkeit sind in Abschnitt 6.3 zu finden.

Die dritte Forschungsfrage **Mit welcher Methodenkombination kann eine GUI für intuitive Roboterprogrammierung im Kontext der MRK gestaltet werden?** wird wie folgt beantwortet: Der Gestaltungsprozess wird in zwei Iterationen durchgeführt. Die erste Iteration beinhaltet die Prozessphasen Analyse, Gestaltung und Evaluierung, die zweite beinhaltet die Phasen Gestaltung und Evaluierung. In der Analysephase werden eine quantitative Studie über die Kenntnisse der Endnutzenden in Bezug auf Programmier- und Editiersoftware sowie eine Produktanalyse durchgeführt. In der ersten Gestaltungsphase wird ein Papierprototyp mit Gestaltungsprinzipien für intuitive Nutzung mit Endnutzenden durchgeführt. Die genaue Beschreibung des Gestaltungsprozesses für intuitive Roboterprogrammierung ist in Abschnitt 6.4 zu finden. In der zweiten Gestaltungsphase wird ein virtuelles, interaktives Mockup entwickelt und in einem Test zur intuitiven Nutzung mit Endnutzenden evaluiert.

Aus der Beantwortung der untergeordneten Forschungsfragen ergibt sich die Antwort auf die übergeordnete Forschungsfrage **Mit welchen Methoden kann eine nutzerzentrierte GUI für die mobile MRK an Montagearbeitsplätzen gestaltet werden, die Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Roboterprogrammierung gewährleistet?** wie folgt: Der ganzheitliche Ansatz für ein Vorgehensmodell erfolgt durch die Kombination der Gestaltungsprozesse für Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung. Dabei wird das Vorgehen in fünf Iterationen empfohlen. Die erste Iteration ist der beschriebene Gestaltungsprozess für Situationsbewusstsein, jedoch ohne die quantitative Studie zur Messung des Situationsbewusstseins. Die zweite Iteration ist die Analysephase und erste Gestaltungs- und Evaluierungsphase für Gebrauchstauglichkeit, mit anschließender quantitativer Studie zur Messung des Situationsbewusstseins. Die dritte und vierte Iteration beschreibt den Gestaltungsprozess für intuitive Roboterprogrammierung. Die fünfte Iteration ist schließlich die letzte Gestaltungs- und Evaluierungsphase des Prozesses für Gebrauchstauglichkeit. Eine detaillierte Beschreibung und Darstellung des ganzheitlichen Gestaltungsprozesses findet sich in Abschnitt 6.5.

7.1.7 Allgemeine Limitationen

Bei der Recherche ergaben sich einige Limitationen, die bei der Einordnung der beschriebenen Arbeit berücksichtigt werden sollten.

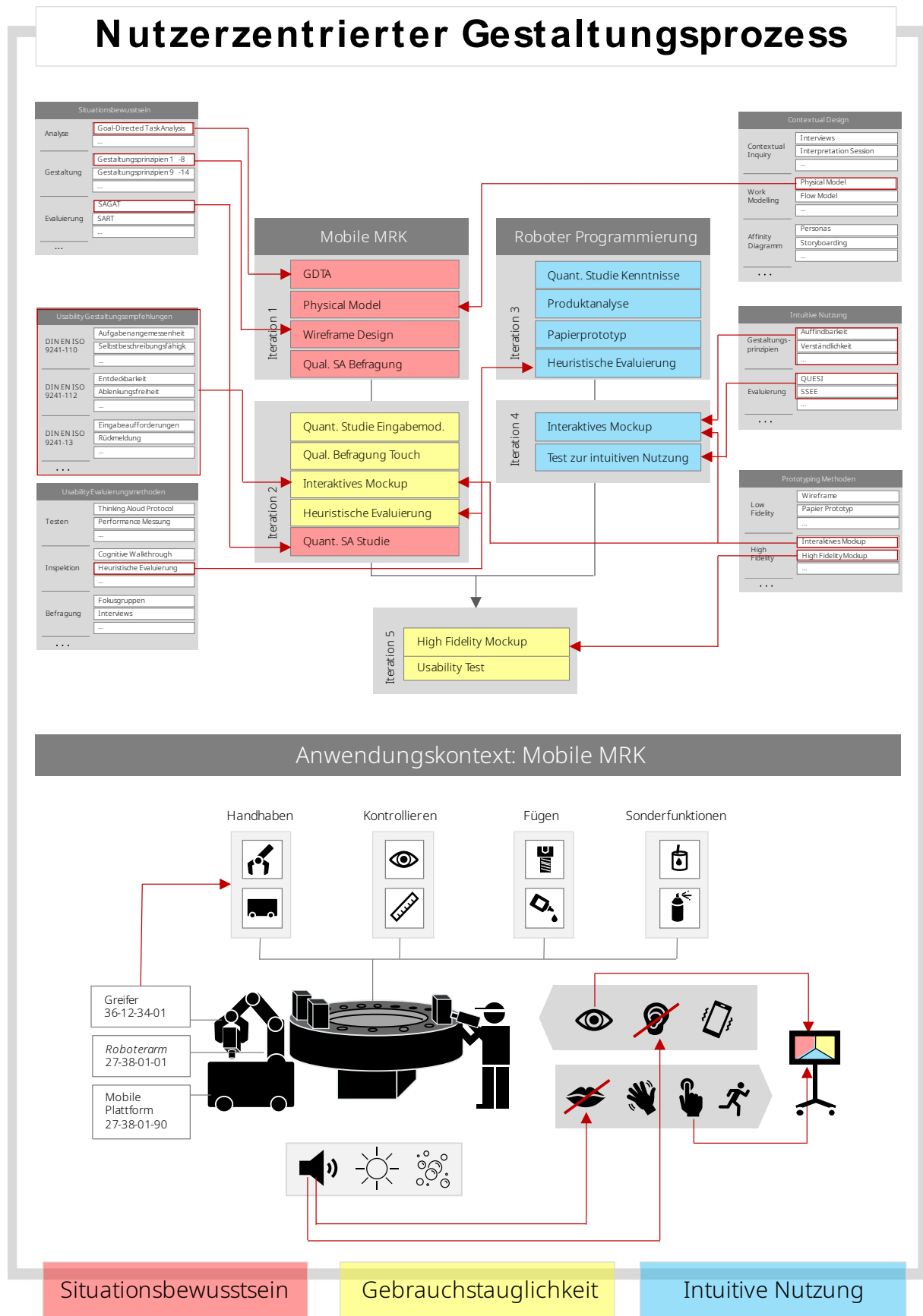
So fand die Validierung des Gestaltungsprozesses nur bei der GUI-Gestaltung bezogen auf Situationsbewusstsein statt. Die Prozesse für Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung wurden nicht durch erneute Durchführung des Vorgehens mit Testpersonen validiert. Trotz der zufriedenstellenden Ergebnisse ist nicht auszuschließen, dass es geeignetere Methoden für die Durchführung des Prozesses gibt. Ebenso wurden einige Methoden, die sich im UX-Design bewährt haben, wie z.B. Personas und Storyboarding, nicht angewendet. Um den optimalen Ansatz zu finden, müssten verschiedene Methoden direkt miteinander verglichen werden.

Weiterhin wurde vorab nicht im gesamten Prozess untersucht, welche Ergebnisse eine Gestaltung der GUI ohne vorgegebene Methoden ergeben hätte. Ebenso der Unterschied zwischen Fachkräften, die das Interface gestalten und Nicht-Fachkräften. Die Validierung des Prozesses erfolgte lediglich in der Gestaltung der GUI für Situationsbewusstsein. Nach dieser Validierung der Gestaltungsphase fand keine Evaluierung mehr statt, um die Qualität der GUI-Gestaltung zu prüfen.

Ferner wurde nicht geprüft, ob die Gestaltung der GUI technisch machbar ist, sondern es wurden lediglich nutzerzentrierte Aspekte betrachtet. Da eine technische Umsetzung meist mit Kompromissen verbunden ist, müsste das implementierte Ergebnis in einer summativen Evaluierung getestet werden, was zeitlich und ressourcentechnisch jedoch nicht möglich war.

Ebenso wurden keine alternativen Anwendungsfälle betrachtet, sondern lediglich die Montage des Behältertisches einer Etikettiermaschine. Im Zusammenhang mit diesem Anwendungsfall wurden dem Roboter auch nicht weitere Fähigkeiten zugeordnet, sondern lediglich die exemplarischen Fähigkeiten, um Servomotoren zu transportieren und einzusetzen.

Schließlich wurde hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und intuitiver Nutzung nicht geprüft, ob die Konstrukte austauschbar sind. Beide Konstrukte benötigen kein dynamisches System und sind daher theoretisch austauschbar, so dass für die Durchführung der gemeinsamen Arbeitsaufgabe eine intuitive GUI und für die Roboterprogrammierung eine gebrauchstaugliche GUI entwickelt werden könnte.

Abbildung 59*Darstellung der gesamten Thematik dieser Forschung**Anmerkung.* Im oberen Teil der Abbildung wird der Gestaltungsprozess abgebildet, der die

angewandten Methoden enthält, als auch weitere Methoden, die die bestehenden Methoden ersetzen oder ergänzen könnten. Der untere Teil der Abbildung beinhaltet den Anwendungskontext der mobilen MRK.

7.2 Fazit

Diese Arbeit hat einen ganzheitlichen Ansatz zur nutzerzentrierten Gestaltung einer GUI für die mobile MRK an Montagearbeitsplätzen verfolgt. Es wurde ein theoretischer Rahmen für die mobile MRK gebildet, um den Kontext generalisierbar zu machen. Der Rahmen enthält Elemente aus verschiedenen Disziplinen wie Arbeitswissenschaft, Betriebswissenschaft, Human Factors und UX-Design. Es wurden drei Studien zur Erforschung von Methodenkombinationen zur GUI-Gestaltung, bezogen auf die Konstrukte Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und intuitive Nutzung, durchgeführt. Jede Studie beinhaltet die Prozessphasen Analyse, Gestaltung und Evaluierung, die in mehreren Iterationen angewandt wurden.

In den Analysephasen wurden Aufgabenanalysen und Nutzeranalysen durchgeführt, um Daten zu sammeln, die auf das GUI-Design übertragen werden können. In den Gestaltungsphasen wurden Gestaltungsempfehlungen zu den jeweiligen Konstrukten aufgegriffen und in die GUI implementiert. In den Evaluierungsphasen wurden qualitative und quantitative Evaluationen durchgeführt, entweder mit Usability-Fachkräften oder mit Endnutzenden. Die Evaluierungen haben grundsätzlich zu guten und erkenntnisreichen Ergebnissen geführt, was auf einen stimmigen Gestaltungsprozess schließen lässt.

Der Gestaltungsprozess ist modular anwendbar, da z.B. bei Wegfall der Roboterprogrammierung auch der Gestaltungsprozess für die intuitive Bedienbarkeit entfallen würde. Die Praxisrelevanz der Arbeit ist gegeben, da innovative Entwicklungen in der Robotik frühzeitig durch die frühzeitige Einbeziehung des nutzenden Menschen menschengerecht gestaltet werden sollten.

Die vorliegende Arbeit liefert somit eine mögliche Antwort auf die Forschungsfrage, wie ein nutzerzentrierter Gestaltungsprozess für eine GUI im Kontext einer mobilen MRK an Montagearbeitsplätzen ganzheitlich entwickelt werden kann.

7.3 Ausblick

Zukünftige Arbeiten sollten weitere Herausforderungen angehen, damit die mobile MRK auch in der Praxis Anwendung finden kann. Die Arbeitssicherheit, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurde, spielt für die praktische Umsetzung eine essenzielle Rolle. Sie kann in rechtliche, menschliche und technologische Faktoren untergliedert werden, die sich auf betrieblicher Ebene abspielen. Eine Basis dafür wurde bereits von Mütze-Niewöhner und Nitsch (2020) geschaffen und in der Einleitung beschrieben. Ausgehend von den in der Arbeit gewonnenen zentralen Erkenntnissen kann wie folgt auf die Themen aus der Einleitung ausgegangen werden:

Rechtliche Aspekte der MRK, in Form von Sicherheitsnormen, müssen bei der Integration von kooperierenden Robotersystemen im Betrieb berücksichtigt werden. Eine zentrale Norm in diesem Kontext ist die ISO 10218 (Teil 1 und 2). Sie adressiert sowohl die roboterspezifische Sicherheit als auch die Interaktion mit dem Menschen. Ergänzend dazu bietet die ISO/TS 15066 spezifische Leitlinien für die sichere Gestaltung kooperierender Robotersysteme und legt durch die Auflistung biomechanischer Grenzwerte Richtlinien für die Risikobewertung und -minderung fest.

Menschliche Faktoren der Arbeitssicherheit beziehen sich auf Untersuchungen zu physiologischen, psychologischen und ethischen Fragestellungen im Kontext der MRK. Die physiologischen Aspekte betreffen den Schutz vor Belastung der Arbeitspersonen (z.B. rückenbelastende Tätigkeiten), den Schutz vor monotoner Arbeit und vor möglichen Kollisionsgefährdungen. Zu den psychologischen Aspekten können Unsicherheiten bezüglich des Datenschutzes und der gefühlten technischen Zuverlässigkeit des Robotersystems gezählt werden. Die Einbeziehung psychologischer Aspekte könnte dazu beitragen, die Auswirkungen der MRK auf das Wohlbefinden der Arbeitskräfte besser zu verstehen. Ethische Aspekte beziehen sich z.B. auf die Erhebung von Qualitätsdaten der Arbeitspersonen, die unter ethischen Gesichtspunkten geprüft werden müssen, damit keine Personenrechte verletzt werden. Die Integration ethischer Leitlinien in die Gestaltung der GUI kann dazu beitragen, eine sichere und akzeptierte MRK zu gewährleisten. Das betrifft etwa die Transparenz von Entscheidungsprozessen des Roboters oder die Möglichkeit, dass Nutzende die Handlungen des Roboters beeinflussen können. Eine Integration physiologischer, psychologischer und ethischer Aspekte in das Design ist bedeutend, um die mobile MRK-Anwendung im Unternehmen einzusetzen.

Einige technische Aspekte sind ebenso erforderlich für den Einsatz von MRK in der Praxis. Dies bezieht sich u.a. auf die Sensorik des kooperierenden Roboters, seine programmierten Fähigkeiten und die Interaktionssysteme, die der Mensch verwenden kann. Die Sensorik im Roboter muss den Menschen früh erkennen, um Verletzungen zu vermeiden. Ebenso Algorithmen, die die Absichten von Montagepersonen erkennen, z.B. dass sie als nächstes den Roboter sehr nahekomen wird. Die technische Umsetzung sicherheitsgerichteter Sensorik muss eine einwandfreie Funktionalität gewährleisten.

Weitere technische Faktoren, die sich zwar nicht auf die Arbeitssicherheit beziehen, jedoch auf die Wirtschaftlichkeit der MRK, sind programmierte Fähigkeiten des Roboters und Interaktionsmöglichkeiten des Menschen. Das Robotersystem sollte mit ausreichend Fähigkeiten ausgestattet sein, um eine stimmige Aufgabenallokation zu ermöglichen, so dass der Roboter voll ausgelastet ist. Die Herausforderung an der technischen Umsetzung von Interaktionskonzepten ist es, multimodale Schnittstellen zu schaffen, die akustische Signale auch in lauten Werkshallen hörbar machen, die Montagepersonen durch Sprachbefehle unterstützen und so Handfreiheit gewährleistet, um die Produktivität und Effizienz zu erhöhen.

Insgesamt bietet die eingehende Erörterung dieser Aspekte im Ausblick nicht nur einen Einblick in die vielversprechende Zukunft der mobilen MRK, sondern erzielt einen umfassenden, praxisorientierten Ansatz, der die Implementierung mobiler, kooperierender Robotik in Unternehmen maßgeblich vorantreibt und somit eine effiziente und sichere Zusammenarbeit von Mensch und Roboter an Montagearbeitsplätzen ermöglicht. Diese Arbeit hat bereits den Grundstein gelegt, um einen methodischen Gestaltungsprozess für eine nutzerzentrierte Interaktion zwischen Mensch und mobilem Roboter zu schaffen.

8 Literaturverzeichnis

- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2018). The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review* 108.6, S. 1488-1542.
- Adamides, G., Katsanos, C., Constantinou, I., Christou, G., Xenos, M., & Hadzilacos, T. (2017). Design and development of a semi-autonomous agricultural vineyard sprayer: Human-robot interaction aspects. *Journal of Field Robotics* 34(8), pp. 1407-1426.
- Adams, J. A. (2006). Human-robot interaction design: Understanding user needs and requirements. In *Proc. of 49th Ann. Meet. of the Human Factors and Ergonomics Society* (S. 447-451). Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Akker, J. v., Gravemeijer, K., McKenney, S., & Nieveen, N. (. (2006). *Educational design research*. London: Routledge.
- Annett, J. (2003). Hierarchical Task Analysis. In *Handbook of cognitive task design*, 2 (S. 17-35).
- Barnard, P. J. (1987). Cognitive resources and the learning of human-computer dialogs. In *Interfacing thought: Cognitive aspects of human-computer interaction* (S. 112-158).
- Bauer, W., Bender, M., Braun, M., Rally, P., & Scholtz, O. (2016). Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen. Stuttgart: IRB Mediendienstleistungen.
- Bazzano, F., Lamberti, F., Sanna, A., Paravati, G., & Gaspardone, M. (2017). Comparing Usability of User Interfaces for Robotic Telepresence. In *VISIGRAPP (2: HUCAPP)* (S. 46-54).
- Berg, J., & Lu, S. (2020). Review of interfaces for industrial human-robot interaction. *Current Robotics Reports*, 1(2), pp. 27-34.
- Berg, J., Lottermoser, A., Richter, C., & Reinhart, G. (2019). Human-Robot-Interaction for mobile industrial robot teams. *Procedia CIRP*, 79, pp. 614-619.
- Berger, J., Colceriu, C., Blank, A., Franke, J., Haerdtlein, C., Hellig, T., . . . Zaeh, M. (2021). *Abschlussbericht: FORobotics-mobile ad-hoc kooperierende Roboterteams*.
- Beumelburg, K. (2005). Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag.

- Birkenkamp, P., Leidner, D., & Lii, N. Y. (2017). Ubiquitous user interface design for space robotic operation. *14th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA)*. European Space Agency (ESA).
- Brettmeister, D., & Chojecki, P. (2018). Design und Evaluation eines non-vs. quasimodalen UI für das gestengesteuerte Teach-in eines Roboters. *Mensch und Computer 2018-Usability Professionals*.
- Buchina, N., Kamel, S., & Barakova, E. (2016). Design and evaluation of an end-user friendly tool for robot programming. In *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. IEEE.
- Bühler, P., Schlaich, P., & Sinner, D. (2017). *Visuelle Kommunikation*. Springer Berlin Heidelberg.
- Chacón, A., Ponsa, P., & Angulo, C. (2021). Usability study through a human-robot collaborative workspace experience. *Designs*, 5(2), 35 (22 Seiten).
- Chivarov, N., Chikurtev, D., Pleva, M., & Ondas, S. (2018). Exploring human-robot interfaces for service mobile robots. In *World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines (DISA)* (S. 337-342). IEEE.
- Deutsches Institut für Normung eV. (1998). DIN EN ISO 9241-13: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 13: Benutzerführung.
- Deutsches Institut für Normung eV. (2011). DIN EN ISO 9241-910: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion.
- Deutsches Institut für Normung eV. (2012). DIN EN ISO 9241-143: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 143: Formulardialoge.
- Deutsches Institut für Normung eV. (2016). DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen.
- Deutsches Institut für Normung eV. (2017). DIN EN ISO 9241-112: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung.
- Deutsches Institut für Normung eV. (2020). DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Interaktionsprinzipien.
- Deutsches Institut für Normung eV. (2020). DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme.

- Di Nuovo, A., Varrasi, S., Conti, D., Bamsforth, J., Lucas, A., Soranzo, A., & McNamara, J. (2019). Usability evaluation of a robotic system for cognitive testing. In *14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)* (S. 588-589). IEEE.
- DIHK. (2021). *Fachkräfteengpässe schon über Vorkrisenniveau - DIHK-Report Fachkräfte 2021*. Brüssel: DIHK.
- Doering, N., Poeschl, S., Gross, H., Bley, A., Martin, C., & Boehme, H. (2015). User-centered design and evaluation of a mobile shopping robot. *International Journal of Social Robotics*, pp. 203-225.
- Drury, J. J., Scholtz, J., & Yanco, H. A. (2003). Awareness in human-robot interactions. In *SMC'03 Conf. Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics* (S. 912-918).
- Drury, J. L., Keyes, B., & Yanco, H. A. (2007). LASSOing HRI: analyzing situation awareness in map-centric and video-centric interfaces. In *Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction* (S. 279-286).
- Drury, J. L., Scholtz, J., & Kieras, D. (2007). Adapting GOMS to model human-robot interaction. In *Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction* (S. 41-48).
- ECLASS e.V. (16. 08 2023). *ECLASS*. Von <https://eclass.eu/> abgerufen
- Elkmann, N., Berndt, D., Leye, S., Richter, K., & Mecke, R. (2015). Arbeitssysteme der Zukunft. In *Produktion und Logistik mit Zukunft* (S. 49-149). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Ender, J. (2021). Design of Industrial Workplaces to relieve Workers when Interacting with Joint-Arm-Robots (Dissertation). Liverpool John Moores University (United Kingdom).
- Endsley, M. (1987). *SAGAT: A methodology for the measurement of situation awareness*. Hawthorne: CA: Northrop Corporation.
- Endsley, M. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. In *Proc. Human Factors Society 32nd Ann. Meet.* (S. 97-101). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Endsley, M. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors* 37.1, S. 32-64.

- Endsley, M. R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In *Proc-IEEE National Aerospace and Electronics Conf.* (pp. 789-795). IEEE.
- Endsley, M. R. (2021). A systematic review and meta-analysis of direct objective measures of situation awareness: a comparison of SAGAT and SPAM. *Human Factors* 63.1, pp. 124-150.
- Endsley, M. R., Bolté, B., & Jones, D. (2003). *Designing for Situation Awareness*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- Endsley, M. R., Selcon, S. J., Hardiman, T. D., & Croft, D. G. (1998). A comparative analysis of SAGAT and SART for evaluations of situation awareness. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. Vol. 42. No. 1* (pp. 82-86). Los Angeles (CA): Sage Publications.
- Fang, H. C., Ong, S. K., & Nee, A. Y. (2014). A novel augmented reality-based interface for robot path planning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 8, 33-42.
- Festo. (22. 08 2023). *Festo cobot – programming robots has never been this easy before!* Von https://www.festo.com/net/en_corp/SupportPortal/Files/732148/Beschreibung_D-RO2104.pdf abgerufen
- Figl, K., & Mensch, U. (2009). ISONORM 9241/10 und Isometrics: Usability-Fragebögen im Vergleich. *Mensch & Computer, Vol. 9*, S. 143-152.
- Frayling, C. (1993). Research in art and design. *Royal College of Art Vol.1 No.1*, S. 1-5.
- Fries, J., Garnadt, N., J., H., Kirsch, F., Lembcke, F., Molitor, P., . . . Schwarz, M. (2020). Nachfrage- und abgebotsseitige Einschränkungen der wirtschaftlichen Aktivität in Deutschland infolge der Corona-Pandemie, Arbeitspapier No. 02/2020. *Sachverständigenrat zur Begutachtung der Gesamtwirtschaftlichen Entwicklung*. Wiesbaden.
- Froschauer, R., Kurschl, W., Wolfartsberger, J., Pimminger, S., Lindorfer, R., & Blattner, J. (2021). A human-centered assembly workplace for industry: Challenges and lessons learned. *Procedia Computer Science*, 180, 290-300.
- Gatsoulis, Y. (2008). Performance metrics and human-robot interaction for teleoperated systems. Diss. University of Leeds (School of Mechanical Engineering).

- Gatsoulis, Y., Virk, G. S., & Dehghani-Sanij, A. A. (2010). On the Measurement of Situation Awareness for Effective Human-Robot Interaction in Teleoperated Systems. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 4(1), pp. 69-98.
- Gaver, W. (2012). What should we expect from research through design? In *Proc. SIGCHI conf. human factors in computing systems* (S. 937-346).
- Google. (23. 08 2023). *Google Play Store*. Von <https://play.google.com/store/> abgerufen
- Gradmann, M., Henrich, D., Orendt, E. M., Riedelbauch, D., Riedl, M., Spangenberg, M., & Werner, T. (2019). Mensch-Roboter-Interaktion. In R. Müller, J. Franke, D. Henrich, B. Kuhelnkötter, A. Raatz, & A. (. Verl, *Handbuch Mensch-Roboter Kollaboration* (S. 169-276). München: Carl Hanser Verlag.
- Granlund, Å., Lafrenière, D., & Carr, D. A. (2001). A pattern-supported approach to the user interface design process. *International Conference on Human-Computer Interaction: 05/08/2001-10/08/2001*.
- Grävemeyer, A. (30. 10 2020). *Intuitive Roboterprogrammierung für Nichtexperten*. Von heise online: <https://www.heise.de/hintergrund/Intuitive-Roboterprogrammierung-fuer-Nichtexperten-4939795.html> abgerufen
- Gustafson, K. L., Branch, R. M., & Alpert, S. A. (2002). *Survey of instructional development models (4th ed.)*. Syracuse University, ERIC Clearinghouse on Information Resources.
- Gutman, D., Olatunji, S., & Edan, Y. (2021). Evaluating levels of automation in human–robot collaboration at different workload levels. *Applied Sciences*, 11(16), 7340 (15 Seiten).
- Hahn, D. (2007). Robotereinsatz in der werkstattorientierten Fertigung (Dissertation, Maschinenbau). Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Hammerstingl, V., & Reinhart, G. (2017). Fähigkeiten in der Montage. *Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)*. TU München, Garching.
- Heinecke, A. (2011). *Mensch-Computer-Interaktion: Basiswissen für Entwickler und Gestalter*. Springer-Verlag.
- Held, T., & Schrepp, M. (2019). UX Professionals als Softwareinspektoren-Wie, wann und warum werden (Experten-) Reviews in der Praxis eingesetzt? In *Mensch und Computer - Usability Professionals*.

- Heydaryan, S., Suaza Bedolla, J., & Belingardi, G. (2018). Safety design and development of a human-robot collaboration assembly process in the automotive industry. *Applied Sciences*, 8(3), S. 344.
- Holtzblatt, K., & Beyer, H. (2017). *Contextual Design - Design for Life*. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann.
- Hotzblatt, K., Wendell, J. B., & Wood, S. (2004). *Rapid contextual design: a how-to guide to key techniques for user-centered design*. Elsevier.
- Hurtienne, J., & Blessing, L. (2007). Design for Intuitive Use-Testing image schema theory for user interface design. In *DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07. 2007* (S. 829-830).
- Intisar, M., Khan, M., Islam, M., & Masud, M. (2021). Computer vision based robotic arm controlled using Interactive GUI. *INTELLIGENT AUTOMATION AND SOFT COMPUTING* 27(2), pp. 533-550.
- ISO, I. S. (2019). ISO 9241–210 Ergonomics of Human-System Interaction - Part 210: Human-Centered Design for Interactive Systems. ISO.
- Ivory, M. Y., & Hearst, M. A. (2001). The state of the art in automating usability evaluation of user interfaces. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 33.4, pp. 470-516.
- Jonas, W. (2007). Research through DESIGN through research: A cybernetic model of designing design foundations. *Kybernetes, Vol. 36*, S. 1362-1380.
- König, C. (2012). Analyse und Anwendung eines menschenzentrierten Gestaltungsprozesses zur Entwicklung von Human-Machine-Interfaces im Arbeitskontext am Beispiel Flugsicherung.
- Kopp, R., Langenhoff, G., & Schröder, A. (2000). Methodenhandbuch - Angewandte empirische Methoden: Erfahrungen aus der Praxis. Dortmund: Landesinstitut Sozialforschungsstelle.
- Kraft, M., & Rickert, M. (2017). How to Teach Your Robot in 5 Minutes: Applying UX Paradigms to Human-Robot-Interaction. In *26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (S. 942-949).
- Kremer, D., Hermann, S., Henkel, C., & Fraunhofer, I. (2018). Mensch-Roboter-Kollaboration für Schwerbehinderte als Beitrag zur Inklusion in der Arbeitswelt. *aq&I Conference 2018*.

- Krot, K., & Kutia, V. (2019). Intuitive methods of industrial robot programming in advanced manufacturing systems. In *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (S. 205-214). Springer International Publishing.
- Leichtmann, B., Nitsch, V., & Mara, M. (2022). Crisis Ahead? Why Human-Robot Interaction User Studies May Have Replicability Problems and Directions for Improvement. *Frontiers in Robotics and AI*, 9.
- Leichtmann, B., Schnös, F., Rinck, P., Zäh, M., & Nitsch, V. (2018). Work system analysis for the user-centered development of cooperative mobile robots. 64. *GfA-Fruehjahrskongress*. Frankfurt a. M.
- Liggieri, K. (2014). Bestmögliche Gestaltung? Zur Untersuchung von Mensch-Maschine-Schnittstellen in der Ergonomie. *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen*. Hamburg, pp. 39-46.
- Lotter, B., & Wiendahl, H.-P. (2013). *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Springer-Verlag.
- Lupetti, M. L., Zaga, C., & Cila, N. (2021). Designerly ways of knowing in HRI: broadening the scope of design-oriented HRI through the concept of intermediate-level knowledge. In *Proc. 2021 ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interaction* (S. 389-398).
- Luria, M., Zimmermann, J., & Forlizzi, J. (2019). Championing Research through design in HRI. arXiv preprint arXiv:1908.07572.
- Marble, J. L., Bruemmer, D. J., & Few, D. A. (2003). Lessons learned from usability tests with a collaborative cognitive workspace for human-robot teams. In *In SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483)* (S. 448-453). IEEE.
- Marvel, J. A., Zimmermann, M., & Antonishek, B. (2020). Towards effective interface designs for collaborative HRI in manufacturing: metrics and measures. In *ACM Trans. Human-Robot Interaction* (S. 1-55).
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Beltz.
- McKay, E. N. (2013). *UI is communication: How to design intuitive, user centered interfaces by focusing on effective communication*. Newnes.

- McKay, E. N., & Musgrave, D. (2018). *Intuitive Design: Eight steps to an intuitive UX*. Black Watch Publishing.
- Meyer-Veltrup, L. (2021, 09 28). *Maschinelle Fertigung im Technologie-Steckbrief: Lohnen sich Roboter im Handwerk?* (Handwerk Magazin) Retrieved 02 11, 2023, from <https://www.handwerk-magazin.de/maschinelle-fertigung-lohnen-sich-roboter-als-mitarbeiter-im-handwerk-237352/>
- Mohs, C., Hurtienne, J., Israel, J. H., Naumann, A. B., Kindsmüller, M. C., Meyer, H. A., & Pohlmeier, A. (2006). IUUI–intuitive use of user interfaces. *Tagungsband UP06*.
- Mohs, C., Hurtienne, J., Israel, J. H., Naumann, A. B., Kindsmüller, M. C., Meyer, H. A., & Pohlmeier, A. (2006). IUUI–intuitive use of user interfaces. In *Tagungsband UP06*.
- Mohs, C., Hurtienne, J., Scholz, D., & Rotting, M. (2006). Intuitivität: definierbar, beeinflussbar, überprüfbar. *VDI BERICHTE*, 1946, 215.
- Muetze-Niewoehner, S., & Nitsch, V. (2020). Arbeitswelt 4.0. In *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft* (S. 1187-1217). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Nelles, J., Brandl, C., & Mertens, A. (2018). Regelkreismodell für die menschenzentrierte Gestaltung und Evaluierung einer Mensch-Roboter-Interaktion am Beispiel eines Mensch-Roboter-Arbeitsplatzes. *Arbeit (s) Wissenschaft (f) t–Grundlage für Management und Kompetenzentwicklung*. 64. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft.
- Nicora, M. L., Ambrosetti, R., Wiens, G. J., & Fassi, I. (2021). Human–robot collaboration in smart manufacturing: Robot reactive behavior intelligence. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(3), 031009.
- Nielsen, J., & Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. *Proc. SIGCHI conf. Human factors in computing systems*, (pp. 249-256).
- Nourbakhsh, I. R., Sycara, K., Koes, M., Yong, M., Lewis, M., & Burion, S. (2005). Human-robot teaming for search and rescue. In *IEEE Pervasive Computing*, 4(1) (S. 72-79).
- Olatunji, S., Potenza, A., Kiselev, A., Oron-Gilad, T., Loutfi, A., & Edan, Y. (2022). Levels of Automation for a Mobile Robot Teleoperated by a Caregiver. In *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)* (pp. 1-21).

- Onnasch, L., Maier, X., & Jürgensohn, T. (2016). Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle. Dortmund: BAUA Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Orendt, E. M., Fichtner, M., & Henrich, D. (2017). MINERIC toolkit: Measuring instruments to evaluate robustness and intuitiveness of robot programming concepts. In *26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (S. 1379-1386). IEEE.
- Pertschy, F. (2021, 06 14). *Maschinenbauer beklagen erneuten Fachkräftemangel*. (Automobil-Produktion) Retrieved 02 11, 2023, from <https://www.automobilproduktion.de/management/maschinenbauer-beklagen-erneuten-fachkraeftemangel-116.html>
- Petruck, H., Nelles, J., Faber, M., Giese, H., Geibel, M., Mostert, S., . . . Nitsch, V. (2020). Human-robot cooperation in manual assembly–interaction concepts for the future workplace. In *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Robots and Unmanned Systems* (S. 60-71). Springer International Publishing.
- Plattner, H., Meinel, C., & Weinberg, U. (2009). *Design Thinking*. Landsberg am Lecht: Mi-Fachverlag.
- Poeschl, S., Doering, N., Boehme, H., & Martin, C. (2009). Mensch-Roboter-Interaktion im Baumarkt - Formative Evaluation eines mobilen Shopping-Roboters. *Zeitschrift für Evaluation*, pp. 27-58.
- Pot, E., Monceaux, J., Gelin, R., & Maisonnier, B. (2009). Choregraphie: a graphical tool for humanoid robot programming. In *RO-MAN 2009-The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (S. 46-51). IEEE.
- Preim, B., & Dachselt, R. (2015). *Interaktive Systeme: Band 2: User Interface Engineering, 3D-Interaktion, Natural User Interfaces*. Springer-Verlag.
- Radmard, S. A., Moon, J., & Croft, E. A. (2015). Interface design and usability analysis for a robotic telepresence platform. In *24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (S. 511-516). IEEE.
- Riedl, M., & Henrich, D. (2019). A Fast Robot Playback Programming System Using Video Editing Concepts. In *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter* (S. 259-268). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

- Riedl, M., Orendt, E. M., & Henrich, D. (2018). Sensor-based loops and branches for playback-programmed robot systems. In *Advances in Service and Industrial Robotics: Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2017* (S. 183-190). Springer International Publishing.
- Riley, J. M., & Endsley, M. R. (2004). The hunt for situation awareness: Human-robot interaction in search and rescue. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 48, No. 3)* (S. 693-697). Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Riley, J. M., & Endsley, M. R. (2005). Situation awareness in HRI with collaborating remotely piloted vehicles. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 49, No. 3)* (S. 407-4011). Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Rupp, M., Parkhurst, E., & Smither, J. (2016). Usability of assistive robotic interfaces. *Gerontechnology*, p. 24.
- Samuelsson-Gamboa, M., Obaid, M., & Ljungblad, S. (2021). Mechanical Wisps: Research through Design of Playful Companion Drones. In *Graduate School Winter Conference*.
- Sawasdichai, N. (2004). An Overview of User-centered Design Approach and Usability Methods in Product Development. *Journal of the Faculty of Architecture King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 1.1*, pp. 35-44.
- Schleicher, T. (2018, October). Leitfaden zur Gestaltung einer gebrauchstauglichen instruktiven Mensch-Roboter-Kollaboration am Produktionsarbeitsplatz. *aw&I Conference (Vol. 3)*.
- Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018). Arbeitswissenschaft im Umriss: Disziplinen-und Konzeptstruktur. In *Arbeitswissenschaft* (S. 1-58).
- Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018). Ergonomische Gestaltung. In *Arbeitswissenschaft* (S. 417-549).
- Schmatz, F., Beuss, F., Sender, J., & Fluegge, W. (2020). Use of human-robot collaboration to enhance process monitoring of mechanical joining. *Use of human-robot collaboration to enhance process monitoring of mechanical joining*, pp. 272-276.
- Schmid, M., & Maier, T. (2017). *Technisches Interface Design: Anforderungen, Bewertung und Gestaltung*. Springer Berlin Heidelberg.

- Schmidtler, J., Körber, M., & Bengler, K. (2016). A trouble shared is a trouble halved - Usability measures for Human-Robot Collaboration. In *IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC)* (S. 217-222). IEEE.
- Scholtz, J. (2002). Human-robot interactions: Creating synergistic cyber forces. In *AAAI Techn. Rep. FS-02-03*. Dordrecht: Springer.
- Scholtz, J. C., Astonishek, B., & Young, J. D. (2005). Implementation of a situation awareness assessment tool for evaluation of human-robot interfaces. In *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part A: Systems and humans* 35.4 (S. 450-459).
- Scholtz, J., Antonishek, B., & Young, J. (2004). Evaluation of a human-robot interface: Development of a situational awareness methodology. In *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences* (S. 9-pp). IEEE.
- Scholtz, J., Young, J., Drury, J. L., & Yanco, H. A. (2004). Evaluation of human-robot interaction awareness in search and rescue. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. ICRA'04 (Vol. 3)* (S. 2327-2332). IEEE.
- Sharma, A., Nazir, S., & Ernstsen, J. (2019). Situation awareness information requirements for maritime navigation: A goal directed task analysis. In *Safety Science, 120* (S. 745-752).
- Sherwin, K. (2022). Natural Mappings and Stimulus-Response Compatibility in User Interface Design. *Nielsen Norman Group*. Retrieved September, 29.
- Siregar, R. F., Syahputra, R., & Mustar, M. Y. (2017). Human-Robot Interaction based GUI. *Journal of Electrical Technology UMY 1(1)*, pp. 10-19.
- Snyder, C. (2004). *Paper prototyping: The fast and easy way to design and refine user interfaces*. Morgan Kaufmann.
- Sriviboon, Y., & Jiamsanguanwong, A. (2022). Usability evaluation and user acceptance of Cobot: case study of universal robots CB series. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Istanbul, Turkey.
- Stapelkamp, T. (2007). *Screen-und Interfacedesign: Gestaltung und usability für Hard-und Software*. Springer-Verlag.
- Stapelkamp, T. (2010). *Interaction- und Interfacedesign*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Steinmetz, F., Wollschläger, A., & Weitschat, R. (2018). Razer - a hri for visual task-level programming and intuitive skill parameterization. In *IEEE Robotics and Automation Letters, 3(3)* (S. 1362-1369).

- Stumm, S., Braumann, J., & Brell-Cokcan, S. (2016). Human-machine interaction for intuitive programming of assembly tasks in construction. In *Procedia CIRP 44* (S. 269-274).
- Taylor, G., Deschamps, A., Tanaka, A., Nichol森, D., Bruder, G., & Welchs, G. &.-S. (2018). Augmented Reality for Tactical Combat Casualty Care Training. In *Int. Conf. Augmented Cognition* (S. 227-239). Cham: Springer.
- Tenner, E. (1997). *Why things bite back: Technology and the revenge of unintended consequences* (1. Vintage Books ed.) . New York: Random House.
- Theis, S. (2019). *Ergonomic visualization of personal health data*. Aachen: dissertation.
- Thesmann, S. (2016). *Interface Design*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Thomas, C., Kuhlenkötter, B., & Klöckner, M. (2014). Mensch-Roboter-Kollaboration – Von der industriellen Produktion bis zum Anwendungsgebiet Rehabilitation. *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen*. Hamburg, pp. 253-261.
- Thormundsson, B. (03. 05 2023). *Global mobile cobots market size 2021-2030*. Von <https://www.statista.com/statistics/1378950/mobile-cobots-market-value/> abgerufen
- Waechter, M., Hoehnel, A., Loeffler, T., & Bullinger-Hoffmann, A. (2017). Partizipative Gestaltung eines gebrauchstauglichen mobilen Assistenzsystems für Instandhalter. In *S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme* (pp. 117-130). as&l Verlag Wissenschaft und Praxis.
- Wahl-Immel, Y. (2021, 11 04). *Zwei Drittel der Unternehmen kämpfen mit Fachkräftemangel*. (Produktion - Technik und Wirtschaft für die Deutsche Industrie) Retrieved 02 11, 2023, from <https://www.produktion.de/wirtschaft/zwei-drittel-der-unternehmen-kaempfen-mit-fachkraeftemangel-432.html>
- Zimmermann, J., & Forlizzi, J. (2014). Research through design in HCI. In *Ways of Knowing in HCI* (S. 167-189). New York: Springer.
- Zühlke, D. (2011). *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Useware-Engineering für technische Systeme*. Springer-Verlag.

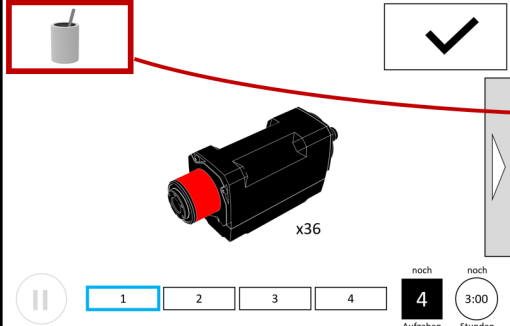
9 Anhang

9.1 Anhang zu Studie 1: Situationsbewusstsein für die mobile MRK (Kap. 3)

9.1.1 Fragebogen zur qualitativen Befragung für Situationsbewusstsein (Kap. 3.4.4)

1		1. Was ist hier die Aufgabe? 2. Woher nimmst Du die Informationen? 3. Wieviele Aufgaben sind noch zu erledigen? 4. Wieviel Zeit hast Du dafür? 5. Inwiefern unterstützen Dich die Darstellungen? 6. Inwiefern unterstützen die Darstellungen unerfahrene Monteure?	
2		7. Was ist hier die Aufgabe? 8. Kann der Roboter hier unterstützen? Inwiefern? 9. Welche Informationen kannst Du der Darstellung entnehmen? 10. Inwiefern unterstützen Dich die Darstellungen?	
	Ein Klick auf den Roboter -Button führt Dich zu den Informationen über den Roboter		
		11. Welche Aufgabe übernimmt der Roboter? 12. Wie lange braucht der Roboter für die Aufgabe? 13. Woher nimmst Du die Informationen? 14. Inwiefern unterstützen Dich die Darstellungen? 15. Weißt Du ausreichend über den Zustand des Roboters Bescheid? 16. Welche Informationen fehlen Dir hier?	
3		Bei dieser Aufgabe geht es um das Verschrauben der Servomotoren. Ein Klick auf den Betriebsmittel -Button links oben ruft weitere Informationen über das Verbindungselement auf.	
		17. Welche Informationen erhältst Du über das Verbindungselement? 18. Inwiefern unterstützt Dich diese Darstellung? 19. Inwiefern werden unerfahrene Monteure dadurch unterstützt? 20. Wo befindest Du Dich insgesamt im Bezug auf das Gesamtziel? 21. Welche Informationen fehlen Dir in dieser Darstellung? 22. Welche Informationen sind unnötig?	
	Ein Klick auf X führt zurück zum Bildschirm mit der Ansicht des aktuellen Standes der Gesamtaufgabe.		
	Wenn die Aufgabe erfüllt ist, klickt man auf das Häkchen und es wird eine Checkliste aufgerufen.		
		23. Wie würdest Du die Checkliste verwenden? (Bei Klick auf X erscheint eine Information darüber, was zu tun ist, z.B. Qualitätsabteilung kontaktieren) 24. Welche Informationen entnimmst Du der Checkliste? 25. Inwiefern unterstützt Dich diese Darstellung? 26. Welche Informationen fehlen Dir in dieser Darstellung? 27. Welche Informationen sind unnötig?	

9.1.2 Leitfaden der quantitativen Studie zur Messung von SA (Kap. 3.4.5)



Task details for Aufgabe 1:

- Schmierstoff:** Lebensmittelverträglich
- Dosierung:** gleichmäßig verteilen
- Bauteil:** Servomotor 11235813 x36

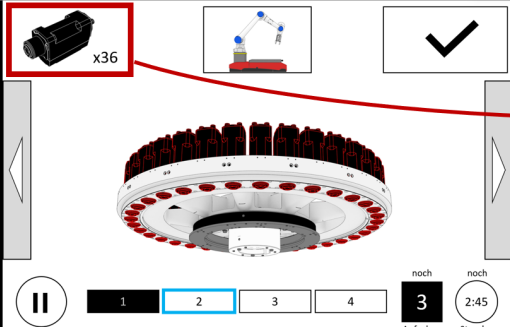
Task details for Aufgabe 1:

- Schmierstoff:** Lebensmittelverträglich
- Dosierung:** gleichmäßig verteilen
- Bauteil:** Servomotor 11235813 x36

Aufgabe 1

1. Was ist bei dieser Aufgabe zu tun?
2. Welcher Betriebsstoff muss verwendet werden?
3. Wie muss die Dosierung erfolgen?
4. Welcher Servomotor muss eingesetzt werden?
5. Wie viele Servomotoren müssen eingefettet werden?
6. Woher weißt Du, ob es der richtige Betriebsstoff ist?

Bild wechselt, wenn befragte Personen den Button benennen, der geklickt werden soll



Task details for Aufgabe 2:

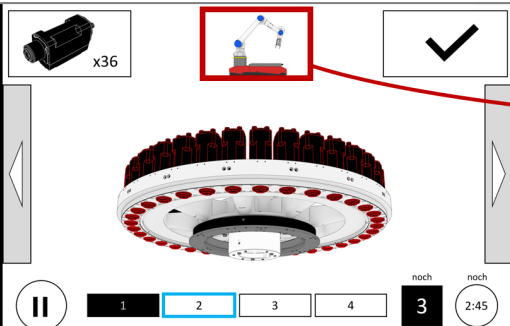
- Bauteil:** Servomotor 11235813
- Nullpunkt:** Nullpunkte bei Markierung
- Reihenfolge:** Nach rechts

Task details for Aufgabe 2:

- Bauteil:** Servomotor 11235813
- Nullpunkt:** Nullpunkte bei Markierung
- Reihenfolge:** Nach rechts

Aufgabe 2

7. Was ist bei dieser Aufgabe zu tun?
8. Woher weißt Du, ob der Roboter bei der Aufgabe unterstützen kann?



Task details for Aufgabe 2:

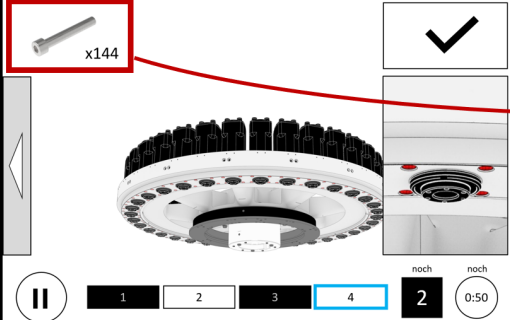
- Positionieren:** 25:00 min
- Servomotor:** 813213455

Task details for Aufgabe 2:

- Positionieren:** 25:00 min
- Servomotor:** 813213455

Aufgabe 2

9. Woher weißt Du, was der Roboter gerade macht?
10. Woher weißt Du, wie viele Motoren er noch positionieren muss?
11. Wann wird der Roboter die Aufgabe abschließen?



x144

Bauteil	Zylinderschraube M16 x 90		x144 eingefettet	X
Reihenfolge	Schrauben über Kreuz anziehen			
Drehmoment	86 Nm			

noch 2 Aufgaben

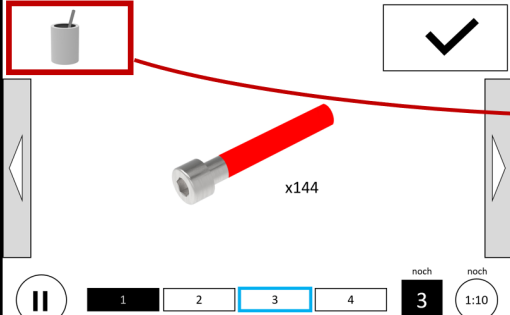
noch 0:50 Stunden

noch 1 Aufgaben

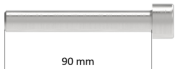
noch 0:20 Stunden

Aufgabe 4

16. Was ist bei dieser Aufgabe zu tun?
17. Bei welcher Aufgabe befindest Du Dich gerade?
18. Was muss beim Anziehen der Schrauben beachtet werden?
19. Woher weißt Du, wieviel Zeit noch übrig ist?



x144

Schmierstoff	Lebensmittelverträglich			X
Dosierung	gleichmäßig verteilen			
Bauteil	Zylinderschraube M16 x 90	Werkstoff 1.4301 Teilenummer 11235813		

noch 3 Aufgaben

noch 1:10 Stunden

noch 3 Aufgaben

noch 1:10 Stunden

Aufgabe 3

12. Was ist bei dieser Aufgabe zu tun?
13. Wie viele Schrauben werden benötigt?
14. Welche Schrauben müssen eingefettet werden?
15. Wie kannst Du erfahren, was die nächste Aufgabe ist?

9.1.3 Bewertungsbogen der quantitativen Studie zur Messung von SA (Kap. 3.4.5)

[illegible]

9.2 Anhang zu Studie 2: Gebrauchstauglichkeit für die mobile MRK (Kap. 4)

9.2.1 Bewertungsbogen zur quantitativen Studie für Eingabemodalitäten (Kap. 4.4.2)

		Wie häufig verwenden Sie diese Eingabeform im Alltag?	Können Sie sich diese Eingabeform bei der Mensch-Roboter-Kollaboration vorstellen?
1. Maus und Tastatur		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht
2. Touchpad (Laptop)		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht
3. Touch Display mit Finger		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht
4. Touch Display mit Stift		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht
5. Sprachsteuerung		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht
6. Gestensteuerung		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht
7. Videospiel Controller		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht
8. Fernbedienung		☐ Fast täglich ☐ Wöchentlich ☐ selten ☐ noch nie	☐ Sehr gut ☐ Grundsätzlich ☐ weniger ☐ Gar nicht

9.2.2 Leitfaden zum Usability Test mit Endnutzenden (Kap. 4.4.6)

Usability Test Aufgaben

Ihre Arbeitsaufgabe ist es, einen Behälter Tisch für eine Etikettiermaschine zu montieren. Bei einigen Arbeitsschritten kann ein mobiler, kooperierender Roboter unterstützen, die Schritte durchzuführen. Eine Software auf dem Tablet leitet Sie durch die Montageaufgabe und ermöglicht die Interaktion mit dem Roboter. Der Roboter ist kollaborativ, somit ist kein Schutzzaun notwendig. Montageperson und Roboter können sich einen Arbeitsraum teilen. Die aktuelle Arbeitsumgebung ist schematisiert auf dem zweiten Bildschirm dargestellt.

1. Sie möchten wissen, welche Funktionen die einzelnen Buttons haben.

Lösung: Finden Sie heraus, wie ihnen das Interface dabei helfen kann.

2. Es sind nur 30 von 36 Motoren vor Ort da.

Aufgabe: Finden Sie mit Hilfe des Interfaces heraus, wo Sie die Motoren erhalten.

3. Die erste Aufgabe ist durchzuführen.

Aufgabe: Starten Sie die Arbeitsaufgabe.

4. Sie sind nicht sicher, welche Menge an Schmierfett aufgetragen werden soll.

Aufgabe: Finden Sie heraus, wieviel Schmierfett aufgetragen werden soll.

5. Sie haben alle Motorwellen eingefettet.

Aufgabe: Schließen Sie die erste Arbeitsaufgabe ab.

6. Die zweite Aufgabe ist mit Hilfe des Roboters durchzuführen.

Aufgabe: Starten Sie den Roboter.

7. Während der Roboter die Motoren einsetzt, können Sie weiter montieren.

Aufgabe: Springen Sie schon mal zur nächsten Aufgabe.

8. Ein Hubwagen muss plötzlich vorbei und der Roboter steht im Weg.

Aufgabe: Halten Sie den Roboter schnell an, danach lassen Sie ihn weiterfahren.

9. Nun sind Schrauben einzufetten. Sie merken, dass nicht ausreichend Schrauben in der Box sind und brauchen neue aus dem Lager.

Aufgabe: Finden Sie mit Hilfe des Interfaces die Lagernummer heraus.

10. Sie gehen ins Lager und nehmen das Tablet mit.

Aufgabe: Finden Sie heraus, wo der Standort des Roboters aktuell ist.

11. Sie möchten genauere Informationen über den Status der Arbeitsaufgabe

Aufgabe: Finden Sie Details über den Aufgabenstatus heraus.

12. Sie haben alle Schrauben eingefettet.

Aufgabe: Schließen Sie die dritte Aufgabe ab.

13. Der Roboter hat seine Aufgabe beendet.

Aufgabe: Schließen Sie die zweite Aufgabe ab und wechseln wieder zu Aufgabe 4.

14. Der Roboter steht im Weg, wo Sie die Servomotoren verschrauben möchten.

Aufgabe: Fahren Sie den Roboter manuell ein Stück zur Seite.

15. Sie wollen wissen, mit welchem Werkzeug Sie die Schraube festziehen können.

Aufgabe: Finden Sie es mit Hilfe des Interfaces heraus.

16. Der Akku des Roboters ist fast leer.

Lösung: Lassen Sie den Roboter zur Heimstation fahren.

17. Alle Servomotoren sind fest verschraubt.

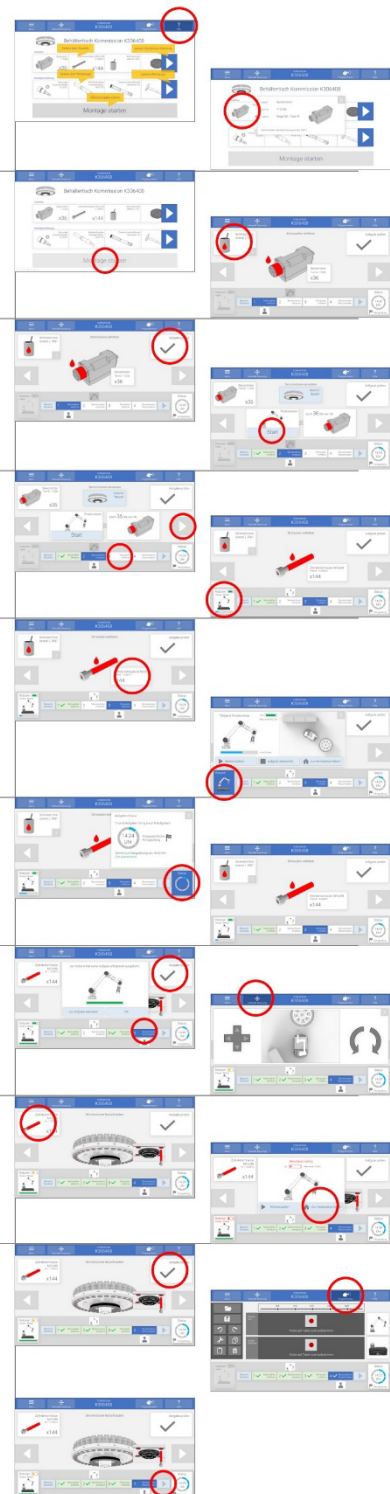
Aufgabe: Beenden Sie die vierte Aufgabe.

18. Sie möchten einen neuen Arbeitsschritt programmieren.

Aufgabe: Wechseln Sie in den Programmier-Modus.

19. Die Roboter-Programmierung ist Teil einer anderen Studie.

Aufgabe: Springen Sie zur nächsten Aufgabe.



9.2.3 Ergebnisse der Heuristischen Evaluierung nach Nielsen (Kap. 4.4.5)

Verbesserungsvorschlag	Teilnehmende				
	1	2	3	4	5
kleiner Einführungstext, Text zu jedem Schritt was zu tun ist. Z.B. Schmieren Sie bitte rot gekennzeichnetes Feld ein. Handlungsaufforderung Schrauben einsetzen sollte irgendwo stehen (Titel)	x				x
Status des Roboters (ist alles ok?),	x				
evtl. Materialnummer des Schmierstoffs	x				
Text zu jeder Aufgabe, ob alles beendet ist. Aktives Feld ist blau, daneben steht Aufgabe, z.B. „Montage Servomotoren“	x				
Aktueller Stand sollte auch textlich angezeigt werden	x				
Status abrufen durch zusätzliche Anzeige. Bei Button oben links evtl. „i“ für Information hinzufügen, in der Nähe wo Platz ist Textinformation	x				
über ausgegrautem Start-Button sollte Checkbox stehen, die erst bestätigt wird, dass Karussell bei Nullpunkt ist	x				
Bei Bauteilansicht Schraubeninformationen hinzufügen	x	x			
Evtl. Anzeige, wieviel Zeit er über dem Termin ist	x				
Roboter-Icon im Fortschritts-Balken		x			
Nicht bearbeitbare Aufgaben inaktiv setzen		x	x		
Bei Roboter steht „Roboter aktivieren“, Pause-Knopf „Roboter nicht aktiv“		x		x	
Roboter-Icon oder Überschrift beim Pause-Zeichen setzen		x			
Mehr Informationen in das Zentrum vom Screen, zum Bauteil zugehörig		x			
Dialogfenster wenn möglich vermeiden. Evtl. Spalte mit Informationen verwenden; Workflow innerhalb eines Schrittes		x	x		

betrachten, sind so viele Unterdialoge notwendig? Besser alles auf einmal sehen bei großen Bildschirmen. Trend geht zu weniger Dialoge				
Stati der Buttons besser hervorheben, ist die Aufgabe abgeschlossen oder in Bearbeitung? Ist es klickbar, obwohl es abgeschlossen ist?	x			
System kann ihm empfehlen, Aufgabe nicht zu beginnen. Zum Beispiel, wenn Servomotoren noch nicht eingefettet sind, sollte Roboter Aufgabe nicht starten können	x			
Klickfelder könnten in einer Doku / Tutorial beschrieben werden. Hilfe-Button für einzelne Aufgaben zusätzlich? Z.B. Schmierstoffklassen Manche Informationen nur als Onboarding verfügbar, z.B. einzelne Buttons, Bedeutung; Tutorial als Einführung oder Beschreibung des Buttons bei der ersten Anwendung	x	x	x	
Aufgaben parallel sehen, nicht Schritt für Schritt			x	x
Aufgabenbeginn empfehlen			x	
Schritt 1 abgeschlossen statt blinken,				x
evtl. zeigen, wie die Schraube ausgerichtet werden soll.				x
Tropfen-Symbol kann zeigen, dass es sich um Schmierfett handelt				x
Häkchen sollten abwählbar sein				x
Roboter sollte an eine neutrale Position zurückgefahren werden				x
Manuelle Funktion hinzufügen zum Verfahren von Roboter				x
Kompromiss? Z.B. Checkbox oder Button „diese Information nicht mehr anzeigen“ und bei Hilfe-Button Information wieder anzeigbar				x
Wann muss ich auf den Roboter warten und was kann gleichzeitig gemacht werden?				x
Unterscheidbarkeit zwischen Bedienfläche und Anzeige				x
Farbe nutzen, um Funktion zu transportieren (Achsen des Roboters nicht farbig)				x

Platz vorsehen für Fehlermeldungen				x	x
Besser 1 von 4 Aufgaben					x
Roboter sollte melden, dass er fertig ist, auch außerhalb der Aufgabenansicht, evtl. auch auditiv					x
Arbeit von Roboter und Mensch als zwei Linien darstellen, Knotenpunkt markieren					x
für Aufgabendarstellung eher Weiter-Knopf					x
eher Radio-Buttons statt Checklist-Buttons					x
Handlungshinweis bei nicht fertigen Aufgaben, z.B. rot angekreuzt und Dialogfenster geschlossen					x
Status wie Akku oder andere Fehlermeldungen fehlen					x
Home-Seite für angehende Aufgaben sollte angedacht werden					x

9.2.4 Ansichten des High Fidelity Mockups (Kap. 4.5.4)

Menü

Manuelle Steuerung

KOMMISSION
K306408

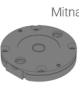
Programmieren

Hilfe

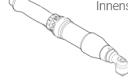
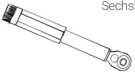


Behälter Tisch Kommission K306408

Stückliste

 Schraube M16 x 90 11235813 x144	 Schmiermittel celeral L 7001	 Mitnahmescheibe 23581321 x36	 Schilderhalter 23581321 x36
--	--	---	---

Benötigtes Werkzeug

 Schrauber Innensechskant 10 (3/8")	 Winkelschrauber Innensechskant 14 (9/16")	 Drehmomentschlüssel Sechskant 10	
---	--	---	--

Montage starten

Menü

Manuelle Steuerung

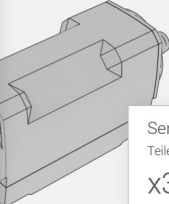
KOMMISSION
K306408

Programmieren

Hilfe

Video-Anleitung zum Motorwellen einfetten





Servomotor
Teile-Nr. 112358
x36

Aufgabe prüfen



Roboter
inaktiv

Übersicht
Stückliste

1 Motorwellen
einfetten

2 Servomotoren
einsetzen

3 Schrauben
einfetten

4 Servomotoren
festschrauben

Status

14:30
Uhr

Fertigstellung

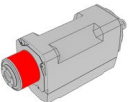
Menü

Manuelle Steuerung

KOMMISSION
K306408

Programmieren

Hilfe

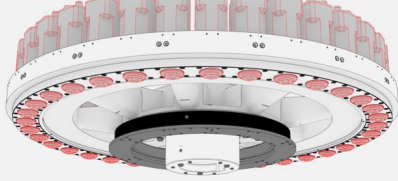


Servomotor
Teile-Nr. 112358
x36

Servomotoren einsetzen



Roboter
Unterstützung



Aufgabe prüfen



Roboter
inaktiv

Übersicht
Stückliste

1 Motorwellen
einfetten

2 Servomotoren
einsetzen

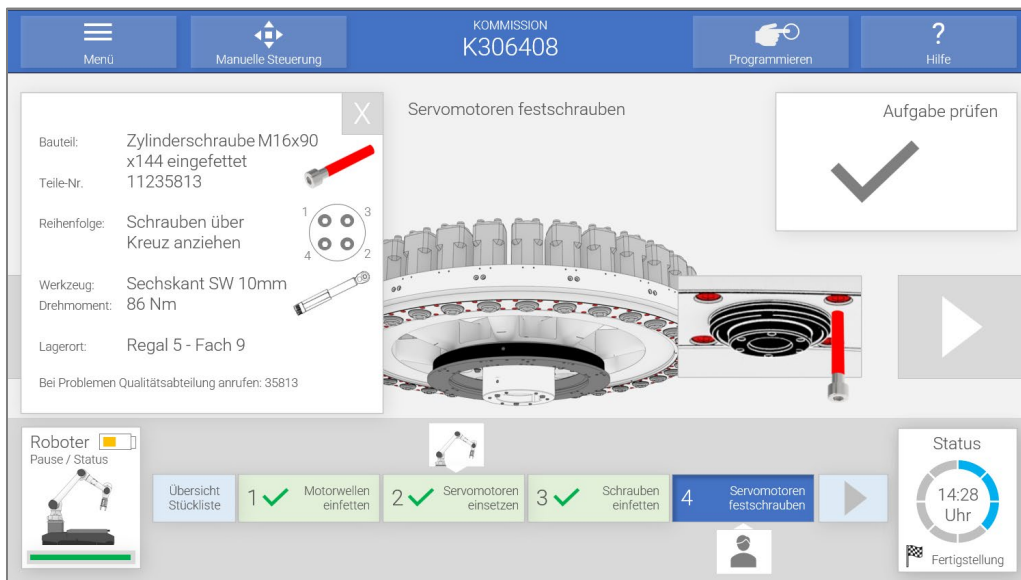
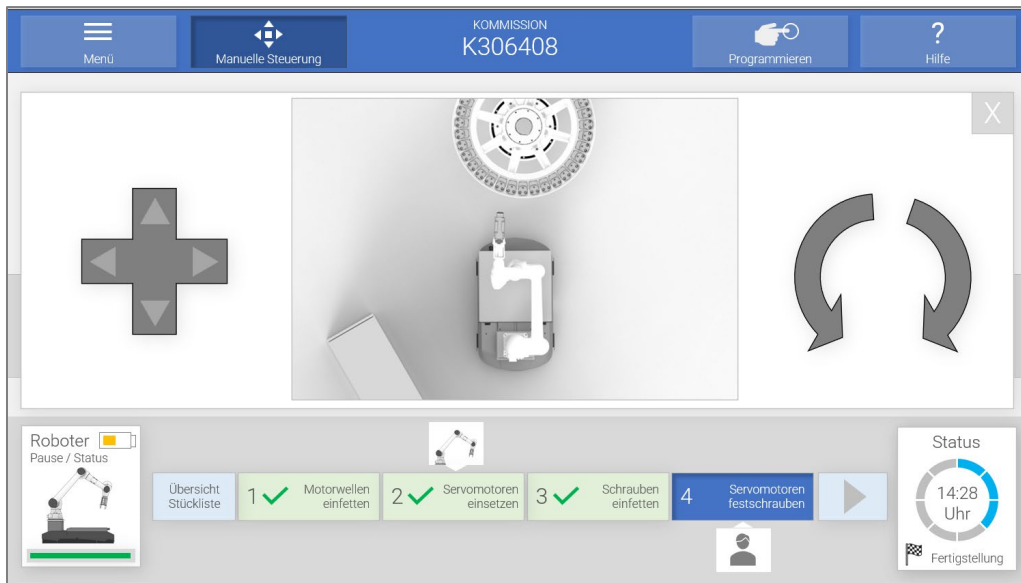
3 Schrauben
einfetten

4 Servomotoren
festschrauben

Status

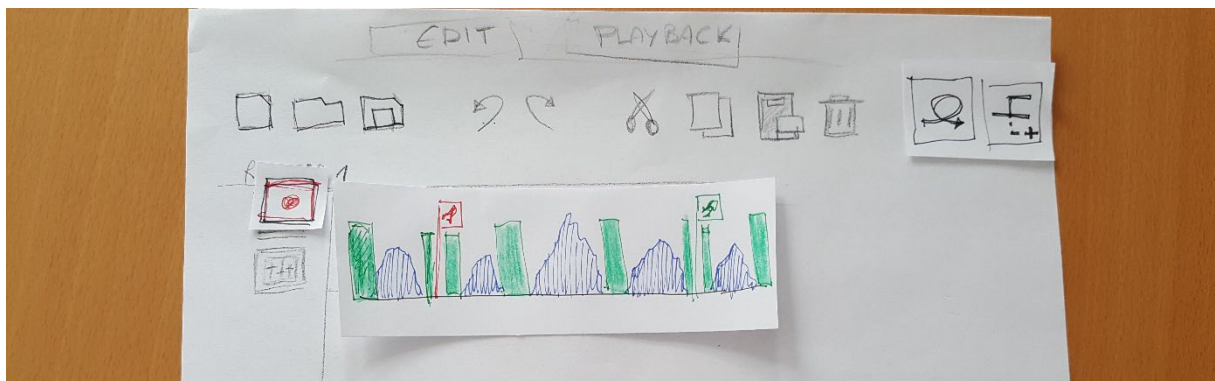
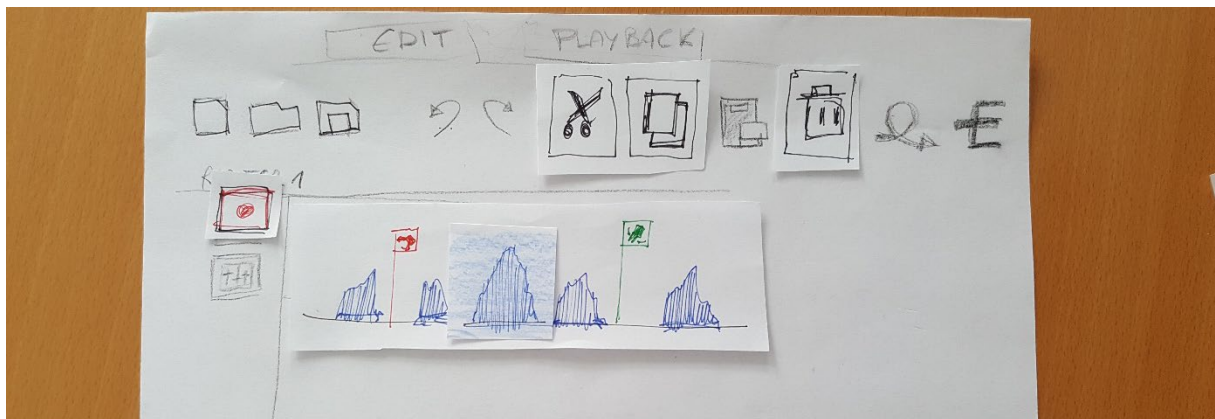
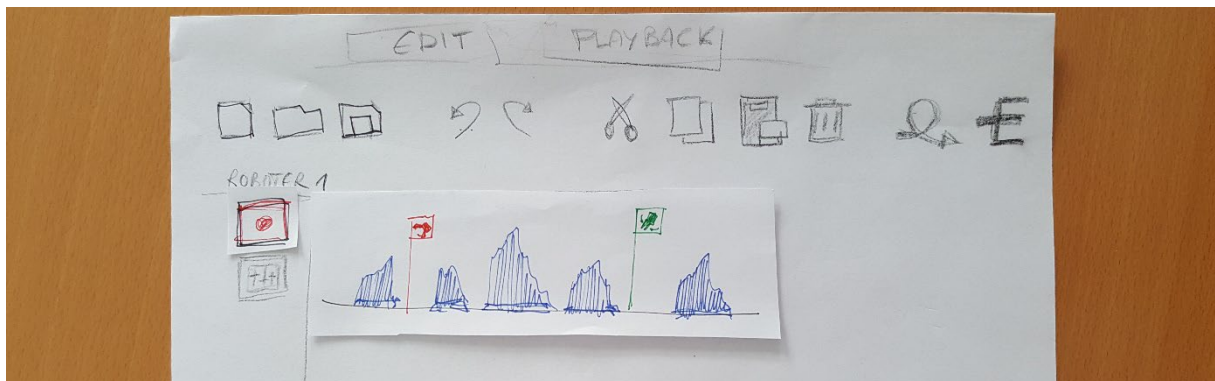
14:30
Uhr

Fertigstellung



9.3 Anhang zu Studie 3: Intuitive Roboterprogrammierung (Kap. 5)

9.3.1 Ansichten des Papierprototyps (Kap. 5.5.3)



9.3.2 Ansichten des interaktiven Mockups (Kap. 5.5.4)

