

**Methodik zur systematischen Analyse der Prozessgestaltung einer  
Mensch-Roboter-Interaktion in der Montage.**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Quirin Tyroller

Tag der mündlichen Prüfung: 20.07.2020

Hauptreferentin:

Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml

Korreferent:

Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova



# Kurzfassung

Die steigenden Anforderungen, die durch volatile Märkte, den Fachkräftemangel sowie wechselnde Regularien an das Produktionssystem im Automobilbau gestellt werden, erfordern eine stetige Weiterentwicklung. Die Integration einer flexiblen Mensch-Roboter-Interaktion in die Montage bietet eine Möglichkeit den Herausforderungen zu begegnen und eröffnet Potentiale für neuartige Produktionskonzepte. Für die Realisierung einer solchen kollaborativen Roboterapplikation ist sowohl die Kenntnis der Bedarfe, als auch die der spezifischen Anforderungen des Anwendungsumfelds erforderlich. Anhand der Vorstellung des Stands der Forschung werden diesbezüglich Fragestellungen ermittelt, die vor dem Hintergrund der Montage in der Automobilindustrie über eine zweistufige Potentialanalyse konkretisiert werden. Darin rückt neben der Gestaltung einer Schnittstelle insbesondere die Interaktion der Partner in den Fokus. Das primäre Ziel besteht darin, die Auswirkungen der Interaktion des Menschen mit dem Roboter auf den Prozess mittels einer geeigneten Methode abbilden zu können und dafür ein passendes Schnittstellenkonzept bereitzustellen.

Auf Basis dessen werden Schnittstellenkonzepte sowie eine Methodik zur Prozessanalyse entworfen, deren Eignung im Rahmen mehrerer experimenteller Untersuchungen evaluiert wird. Der erste Experimentalblock widmet sich der Eignungsprüfung der Schnittstellenkonzepte, um eine negative Beeinflussung der Interaktion vor dem Einsatz in einem kollaborativen Anwendungsfall auszuschließen und erste Implikationen zu erfassen. Der zweite Block dient der Validierung der entwickelten Methodik sowie der Ermittlung des Effekts von Gestaltung und Nutzung der Schnittstelle auf den Prozessablauf. Dies erfolgt anhand einer adaptierten Montageapplikation aus einem Automobilwerk. Die Ergebnisse zeigen auf, dass ein kollaborativer Prozess anhand des aufgestellten Modells ganzheitlich erfassbar ist und die resultierende Aussage sowohl eine effiziente Prozessaufteilung, als

auch die subjektive Wahrnehmung des menschlichen Prozessteilnehmers widerspiegelt. Im Anschluss an die experimentellen Untersuchungen werden Implikationen für die Gestaltung des Montageprozesses und die Eignung von Schnittstellen diskutiert. Neben den identifizierten Grenzen werden darin Potentiale zur Weiterentwicklung sowie eine Empfehlung zur Gestaltung aufgezeigt.

## Abstract

The increasing demands placed on the production system in the automotive industry by volatile markets and changing regulations call for constant further development. The integration of a flexible human-robot interaction into the assembly offers a possibility to meet the challenges and open potentials for new production concepts. The realization of such a collaborative robot application demands both knowledge of the requirements and the specifications of the application environment. On the basis of the presentation of the state of the art in research, questions will be determined which will be concretized against the background of assembly in the automotive industry via a two-stage potential analysis. In addition to the design of an interface, it focuses in particular on the interaction of the partners. The primary goal is to map the effects of human interaction with the robot on the process using a suitable method and to provide a corresponding interface concept.

On this basis, interface concepts and a methodology for process analysis will be developed, the suitability of which will be evaluated within the framework of several experimental investigations. The first experimental block is dedicated to the suitability test of the interface concepts in order to rule out a negative influence on the interaction prior to use in a collaborative application case and to record initial implications. The second block serves the validation of the developed methodology as well as the determination of the effect of design and use of the interface on the process flow. This is done using an adapted assembly application from an automotive plant. The results show that a collaborative process can be captured holistically on the basis of the model set up and that the resulting statement reflects both an efficient process division and the subjective perception of the human process participant. Following the experimental investigations, implications for the design of the assembly process and the suitability of interfaces will be discussed. In addition to the identified limits, potentials for further development and a recommendation for design are pointed out.



# Danksagung

Allen voran gilt mein herzlicher Dank Frau Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml für ihr Vertrauen und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Ihre Anregungen auf fachlicher als auch persönlicher Ebene waren sehr hilfreich und trugen in großem Maße zum Gelingen des Forschungsvorhabens bei. Ausdrücklich danke ich auch Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova für die Übernahme des Korreferats.

Für die zahlreichen Ideen, Lösungsansätze, den wertvollen fachlichen Austausch sowie die hervorragende Arbeitsatmosphäre während des Entstehens dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Promotionskollegen Dr. Johannes Bix und Dr. Max Kossmann bedanken. Besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang auch Toni Schulz sowie Claudia Rackl und Dr. Thomas Herzinger für ihre Unterstützung und die vielen Möglichkeiten während der Promotionszeit.

Meinen Eltern und Geschwistern und ganz besonders meiner Frau Jessica danke ich für ihre Anmerkungen, das kritische Korrekturlesen, die mentale Unterstützung und ihre Rücksichtnahme. Ihr habt in unschätzbare Weise zur Ermöglichung und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen!

München, im Juli 2020

*Quirin Tyroller*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung . . . . .	4
1.3	Vorgehensweise . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Montage . . . . .	7
2.1.1	Montage im Automobilbau . . . . .	9
2.1.2	Methoden der Prozessanalyse . . . . .	11
2.2	Mensch-Roboter-Interaktion . . . . .	18
2.2.1	Formen der Mensch-Roboter-Interaktion . . . . .	19
2.2.2	Mensch-Roboter-Schnittstelle . . . . .	28
2.3	Stand der Forschung . . . . .	35
2.4	Zusammenfassung . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Bedarfsanalyse</b>	<b>43</b>
3.1	Potentialanalyse . . . . .	43
3.1.1	Klassifizierung von Anwendungsszenarien . . . . .	44
3.1.2	Fragebogen . . . . .	50
3.1.3	Ergebnisse . . . . .	51
3.1.4	Einordnung in den Rahmen des Forschungsbedarfs . . . . .	58
3.2	Handlungsbedarf . . . . .	62
3.3	Zusammenfassung . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Schnittstellenkonzeption und Prozessinteraktionssystematik</b>	<b>65</b>
4.1	Konzeption der Mensch-Roboter-Schnittstelle . . . . .	65
4.1.1	Steuermodule . . . . .	67

4.1.2	Informationsmodule . . . . .	73
4.2	Systematik der Prozessinteraktionsanalyse . . . . .	78
4.3	Zusammenfassung . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Technische Evaluation der Schnittstellen</b>	<b>89</b>
5.1	Experimentelle Evaluation der Eingabemodule . . . . .	89
5.1.1	Bestimmung der Reaktionszeit . . . . .	92
5.1.2	Evaluation der Gestensteuerung . . . . .	95
5.1.3	Evaluation der Sprachsteuerung . . . . .	101
5.1.4	Diskussion . . . . .	109
5.2	Gebrauchstauglichkeit der Informationsmodule . . . . .	112
5.2.1	Methodik . . . . .	113
5.2.2	Ergebnis . . . . .	118
5.2.3	Diskussion . . . . .	123
5.3	Zusammenfassung . . . . .	125
<b>6</b>	<b>Experimentelle Evaluation der Prozessinteraktionssystematik</b>	<b>127</b>
6.1	Beschreibung des Anwendungsszenarios . . . . .	127
6.2	Theorie und Zielsetzung . . . . .	128
6.2.1	Montagekonzepte und theoretische Vorbewertung	129
6.2.2	Zielsetzung . . . . .	136
6.3	Evaluation der Prozessgestaltung . . . . .	139
6.3.1	Methodik . . . . .	139
6.3.2	Ergebnis . . . . .	150
6.3.3	Diskussion . . . . .	171
6.4	Einfluss der Schnittstelle auf die Prozessinteraktion . . . . .	185
6.4.1	Methodik . . . . .	185
6.4.2	Ergebnis . . . . .	191
6.4.3	Diskussion . . . . .	205
6.5	Zusammenfassung . . . . .	210

---

<b>7 Diskussion</b>	<b>213</b>
7.1 Mensch-Roboter-Schnittstelle . . . . .	213
7.1.1 Eignung der konzipierten Mensch-Roboter-Schnittstelle . . . . .	213
7.1.2 Implikationen für die Gestaltung einer Mensch-Roboter-Schnittstelle . . . . .	216
7.2 Montageprozess . . . . .	217
7.2.1 Eignung der Prozessinteraktionssystematik zur Beschreibung einer Mensch-Roboter-Interaktion	218
7.2.2 Implikationen für die prozessuale Gestaltung einer Mensch-Roboter-Interaktion . . . . .	220
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>221</b>
8.1 Zusammenfassung . . . . .	221
8.2 Ausblick . . . . .	224
<b>9 Literaturverzeichnis</b>	<b>227</b>
<b>A Anhang</b>	<b>247</b>
A.1 Abbildungen und Tabellen . . . . .	247
A.2 Fragebögen . . . . .	253
A.3 MTM Datenblätter . . . . .	273



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Vision einer zukünftigen Automobilproduktion nach Bix (2016).	3
1.2	Struktur der vorliegenden Arbeit. . . . .	5
2.1	Einordnung der manuellen, hybriden und automatischen Montagesysteme. . . . .	8
2.2	Fügeprozesse in der Fahrzeugmontage. . . . .	10
2.3	Einordnungsschemata der OWAS-Aktionskategorien. . . . .	17
2.4	Illustration der sechs Rollen des Menschen in der Mensch-Roboter-Interaktion. . . . .	20
2.5	Arten der Interaktion von Mensch und Roboter. . . . .	22
2.6	Beispiele für Professional Service Roboter. . . . .	24
2.7	Beispiele für Personal Service Roboter. . . . .	25
2.8	Industrieroboter im Karosseriebau BMW Werk Spartanburg (Byrnes, 2016). . . . .	26
2.9	UR10 Roboter beim Anrollen der Türschallisolierung im BMW Werk Spartanburg (BMW AG, 2016). . . . .	28
2.10	Schematische Skizze des noisy channel nach Jurafsky & Martin (2000). . . . .	30
2.11	Stufen der Handgestenerkennung (Premaratne, 2014). . . . .	32
3.1	Identifizierte Szenarien für MRI-Applikationen. . . . .	50
3.2	Bewertung des Potentials menschlicher Wahrnehmungssysteme zur Interaktion mit einem Roboter in industrieller Umgebung. . . . .	52
3.3	Eignung unterschiedlicher Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Steuerung eines Roboters in einem industriellen Fertigungsprozess. . . . .	53
3.4	Bewertung von Einflussfaktoren auf die Akzeptanz einer Interaktion mit einem Roboter in einem industriellen Fertigungsprozess. . . . .	53

3.5	Gestaltung der Interaktion von Mensch und Roboter in einem industriellen Fertigungsprozess. . . . .	54
3.6	Potentiale der Mensch-Roboter-Interaktion in der Montage in Abhängigkeit des koexistenten und kollaborativen Betriebsmodus.	55
3.7	Bewertung der Relevanz der definierten Szenarien hinsichtlich ihres Anwendungspotentials in unterschiedlichen Bereichen der Automobilproduktion. . . . .	56
3.8	Bewertung der Eignung von Schnittstellensystemen in Abhängigkeit der definierten Szenarien. . . . .	57
3.9	Herausforderungen und Potentiale einer kollaborativen MRI in der Montage. . . . .	58
4.1	Schematische Darstellung von Informationsquellen im Fahrzeugwerk. . . . .	66
4.2	Bewertung der Steuerungskonzepte Taster, Gestensteuerung, Sprachsteuerung und sensitive Flächen. . . . .	68
4.3	Für die Versuche verwendeter Buzzer der Fa. Eaton (Eaton, 2018).	68
4.4	Verschiedene Stufen der Handsegmentierung nach Pielmeier (2016). . . . .	71
4.5	Merkmalsextraktion und Klassifikation nach Pielmeier (2016).	71
4.6	Informationssysteme in der Produktion. . . . .	75
4.7	Funktionsweise der Leuchtringe am Roboter zur Informationsübermittlung des Roboterzustands an den Menschen.	76
4.8	Konzepte zur Informationsübermittlung für die Mensch-Roboter-Interaktion mittels Leuchtringen am Roboter, Projektion per Beamer und Lautsprecher zur Bereitstellung von Handlungsanweisungen oder Warnungen. . . . .	78
4.9	Verkürzung der Montagezeit in einem fiktiven Prozess mit vier parallel durchführbaren Prozessschritten. . . . .	79
4.10	Unterschiedliche Interaktionsmodelle von Mensch und Roboter in Abhängigkeit der Vorrangfolge der einzelnen Montageschritte.	80

---

4.11	Zeitmaße in einem beispielhaften Prozess mit fünf Prozessschritten. . . . .	82
5.1	Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Reaktionszeit des Roboters mittels eines UR5 Roboters. . . . .	93
5.2	Subjektive Bewertung der Reaktionszeiten des Roboters. . . . .	95
5.3	Gestenset zur Evaluation der Gestensteuerung. Die Darstellung zeigt die Visualisierung der erkannten Geste durch das System auf einem Bildschirm . . . . .	96
5.4	Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Reaktionszeit des Roboters auf Anweisungen per Fingergeste. . . . .	97
5.5	Reaktionszeit des Robotersystems in Abhängigkeit der 13 definierten Gesten (N=10). . . . .	100
5.6	Subjektive Bewertung der Gestensteuerung. . . . .	101
5.7	Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Reaktionszeit des Roboters auf Anweisungen per Sprache. . . . .	103
5.8	Flussdiagramm der Steuerung des Roboters per Sprachsteuerung.	104
5.9	Reaktionszeit des Roboters in Abhängigkeit des Faktors Umgebung, Anweisung und der Interaktion beider Faktoren. . . . .	107
5.10	Bewertung der Fragen zur Steuerung des Roboters über die Sprachsteuerung. . . . .	108
5.11	Subjektive Bewertung der Eingabemodule Gesten- und Sprachsteuerung. . . . .	111
5.12	Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Einflussgrößen auf die Wahrnehmung des Menschen. . . . .	116
5.13	Experimenteller Aufbau zur Untersuchung des Einflusses der Informationsmodule auf die Wahrnehmung des Menschen. . . . .	116
5.14	Vergleich der Bewertung der acht Bewegungsabläufe des Roboters mit Endposition Brust und Kopf. . . . .	119

5.15	Ergebnisse der Befragung zur subjektiven Einschätzung der Faktoren Geschwindigkeit, Abstand, Bewegungsbahn sowie Höhe der Endposition und deren Einfluss auf die Wahrnehmung der Probanden. . . . .	119
5.16	Einfluss der Informationsmodule auf die Wahrnehmung der Faktoren Geschwindigkeit, Endposition Kopf/Brust, Abstand sowie Anfahrtswinkel. . . . .	120
5.17	Bewertung der Informationsmodule hinsichtlich einer angenehmer bzw. unangenehmer empfundenen Veränderung in ihrer Wahrnehmung. . . . .	121
5.18	Subjektive Empfindung von Verständnis und Sicherheit durch den Einsatz der Informationsmodule und Vergleich der Eigenschaften von Informationsmodulen. . . . .	121
5.19	Bewertung der Informationsmodule auf Basis von Schulnoten. . . . .	122
6.1	Übersicht über Prozess und Bauteile der Abgasturboladervormontage. . . . .	128
6.2	Montagevorranggraph und Prozessschritte der ATL-Montage. . . . .	129
6.3	Abfolge der einzelnen Prozessschritte der Montage des Abgasturboladers in Abhängigkeit der definierten Konzepte. . . . .	132
6.4	Experimentalaufbau des Interaktionsarbeitsplatzes. . . . .	141
6.5	Montagespannvorrichtungen am Interaktionsarbeitsplatz. . . . .	143
6.6	Experimenteller Aufbau der Teilebereitstellung durch einen UR10 Roboter. . . . .	143
6.7	Experimenteller Aufbau des mit Abgasturboladern und Kleinladungsträgern bestückten Bereitstellungsregals für Roboter und Mensch. . . . .	144
6.8	Schematischer Überblick der Kommunikationsstruktur des Interaktionsarbeitsplatzes. . . . .	145
6.9	Übersicht über die Konzepte <i>K1-K3</i> mit Einsatz aller Informationsmodule. . . . .	149

---

6.10	Prozesszeit in Abhängigkeit der Montagekonzepte <i>K0</i> , <i>K1</i> , <i>K2</i> , <i>K3</i> (N=24). . . . .	151
6.11	Prozesszeit in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung (N=24). . . . .	153
6.12	Prozesszeit in Abhängigkeit der Faktoren Robotersteuerung und Montagekonzept (N=24). . . . .	154
6.13	Verteilung der Zeitanteile der PIS in Abhängigkeit von Handlingskonzept ( <i>K1</i> ), Logistikkonzept ( <i>K2</i> ) und Kombikonzept ( <i>K3</i> ) sowie Robotersteuerung per Buzzer (B) oder Geste (G). . . . .	157
6.14	Belastungsindex in Abhängigkeit der Montagekonzepte <i>K0</i> , <i>K1</i> , <i>K2</i> , <i>K3</i> (N=24). . . . .	160
6.15	Belastungsindex in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung (N=24). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwerts der abhängigen Stichproben. . . . .	161
6.16	Belastungsindex in Abhängigkeit der Faktoren Robotersteuerung und Montagekonzept (N=24). . . . .	163
6.17	Subjektive Bewertung der Prozesssteuerung über die Robotersteuerung. . . . .	165
6.18	Subjektive Bewertung der Arbeitsaufteilung und -gestaltung zwischen Mensch und Roboter in Handlingskonzept ( <i>K1</i> ), Logistikkonzept ( <i>K2</i> ) und Kombikonzept ( <i>K3</i> ). . . . .	166
6.19	Subjektive Wahrnehmung des Anteils der Robotertätigkeit in Handlingskonzept ( <i>K1</i> ), Logistikkonzept ( <i>K2</i> ) und Kombikonzept ( <i>K3</i> ) sowie subjektive Empfehlung zur Anpassung der Robotertätigkeit in den einzelnen Konzepten. . . . .	166
6.20	Subjektive Bewertung der Kollaboration der Probanden mit dem/den Roboter/n in Handlingskonzept ( <i>K1</i> ), Logistikkonzept ( <i>K2</i> ) und Kombikonzept ( <i>K3</i> ). . . . .	167

6.21	Subjektive Bewertung der Informationsmodule bezüglich ihrer Eignung zur Bereitstellung von Information innerhalb des Montageprozesses. . . . .	169
6.22	Subjektive Bewertung der körperlichen und psychischen Beanspruchung von Handlingskonzept ( <i>K1</i> ), Logistikkonzept ( <i>K2</i> ) und Kombikonzept ( <i>K3</i> ) gegenüber dem Referenzkonzept ( <i>K0</i> ). . . . .	170
6.23	Subjektive Bewertung des Stressniveaus während der Montage in Abhängigkeit der Montagekonzepte <i>K1</i> , <i>K2</i> , <i>K3</i> und <i>K0</i> . . .	171
6.24	Belastungsindex in Abhängigkeit der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung sowie der Zeit. . . . .	179
6.25	Übersicht über die zeitlichen Anteile (Intervall 30 Sekunden) der Aktionskategorien des Rückens in den vier Kategorien überdurchschnittlich groß, groß, normal und klein im Logistikkonzept ( <i>K2</i> ). . . . .	181
6.26	Zeitlicher Anteil der OWAS-Aktionskategorien in Bezug auf die Armhaltung in Abhängigkeit der Probandenkategorien überdurchschnittlich groß, groß, normal und klein des Kombikonzept ( <i>K3</i> ). . . . .	183
6.27	Schematische Übersicht über den modifizierten Aufbau des Interaktionsarbeitsplatzes. . . . .	188
6.28	Prozesszeit in Abhängigkeit der Montagekonzeptvarianten manuelles Referenzkonzept ( <i>K0</i> ), optimiertes Handlingskonzept ( <i>K1<sub>opt</sub></i> ) und opt. Kombikonzept ( <i>K3<sub>opt</sub></i> ) (N=8). 192	
6.29	Prozesszeit in Abhängigkeit der Varianten des Faktors Robotersteuerung (N=8). . . . .	193
6.30	Prozesszeit in Abhängigkeit der Faktorstufen von Robotersteuerung und Montagekonzept ( <i>K1<sub>opt</sub></i> =optimiertes Handlingskonzept, <i>K3<sub>opt</sub></i> =opt. Kombikonzept) (N=8). . . . .	194

---

6.31	Verteilung der Zeitanteile der PIS in Abhängigkeit der optimierten Montagekonzepte Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) und Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ) sowie der Robotersteuerung per Buzzer, Geste oder Sprache. . . . .	197
6.32	Subjektive Bewertung und Vergleich der Prozesssteuerung über die Varianten der Robotersteuerung in Vor- (V1) und Zweitversuch (V2). . . . .	198
6.33	Subjektive Wahrnehmung der Arbeitsaufteilung und -gestaltung zwischen Mensch und Roboter in Handlings- ( $K1$ ) und optimiertem Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) sowie Kombi- ( $K3$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ). . . . .	199
6.34	Subjektive Empfehlung der Probanden zur Anpassung der Robotertätigkeit und deren Wahrnehmung bzgl. des Anteils im Prozess in Abhängigkeit der Montagekonzepte $K1 / K1_{opt}$ und $K3 / K3_{opt}$ . . . . .	200
6.35	Subjektive Bewertung der Kollaboration der Probanden mit dem/den Roboter/n in den Montagekonzepten Handlings- ( $K1$ ) und optimiertes Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) sowie Kombi- ( $K3$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ). . . . .	201
6.36	Subjektive Bewertung der Robotersteuerung per Buzzer, Geste und Sprache anhand von Kriterien der Gebrauchstauglichkeit. . . . .	202
6.37	Subjektive Bewertung der Robotersteuerung hinsichtlich ergonomischer Bedienbarkeit und Stressniveau. . . . .	203
6.38	Subjektive Bewertung der körperlichen und psychischen Beanspruchung in Abhängigkeit von Handlings- ( $K1$ ) und optimiertes Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) sowie Kombi- ( $K3$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ). . . . .	203
6.39	Subjektive Bewertung des Stressniveaus während des Montageprozesses in Abhängigkeit der Konzepte $K1 / K1_{opt}$ , $K3 / K3_{opt}$ und $K0$ . . . . .	204

A.1	Detaillierte Auflistung der über den Fragebogen ermittelten Herausforderungen der MRI. . . . .	251
A.2	Detaillierte Auflistung der über den Fragebogen ermittelten Potentiale der MRI. . . . .	251
A.3	Zeitlicher Anteil der OWAS-Aktionskategorien in Bezug auf die Haltung des Rückens in Abhängigkeit der Probandenkategorien und Montagekonzepte. . . . .	252
A.4	Fragebogen zur Bewertung von Potentialen der Mensch-Roboter-Interaktion im industriellen Umfeld (Potentialanalyse, Kap. 3). . . . .	253
A.5	Fragebogen zur Bewertung des Effekts einer informativen Mensch-Roboter-Schnittstelle in der industriellen Fertigung (Techn. Schnittstellenevaluation, Kap. 5). . . . .	258
A.6	Fragebogen zur Bewertung der ergonomischen und praktischen Anwendbarkeit der Mensch-Roboter-Interaktion in einem exemplarischen Montageprozess (Versuch 1, Kap. 6). . . . .	262
A.7	Fragebogen zur ergonomischen und praktischen Bewertung der Mensch-Roboter-Interaktion in einem exemplarischen Montageprozess mit Fokus auf die Schnittstelle (Versuch 2, Kap. 6). . . . .	269

# Tabellenverzeichnis

2.1	Öffentlich geförderte Projekte mit Fokus auf die Mensch-Roboter-Interaktion in der industriellen Anwendung . . . . .	38
3.1	Klassifikationsparameter der Mensch-Roboter-Interaktion nach Goodrich und Schultz (2007) sowie Steinfeld et al. (2006) . . . . .	45
3.2	Kriterien und deren Definition zur Klassifizierung von Anwendungsfällen der Mensch-Roboter-Interaktion . . . . .	46
3.3	Mittelwerte der Gruppen nach der Bestimmung über das K-Means-Verfahren . . . . .	48
4.1	Parameter einer Gestensteuerung und deren Ausprägungen basierend auf Preim und Dachselt (2015) . . . . .	69
4.2	Parameter einer Sprachsteuerung und deren Ausprägungen basierend auf Pfister und Kaufmann (2017) . . . . .	72
4.3	Konzeptionsparameter der Informationsmodule und deren Ausprägungen . . . . .	74
4.4	Objektive Messgrößen zur Evaluation der Fluency of Interaction in einer Mensch-Roboter-Kollaboration nach Hoffman (2013) . . . . .	81
4.5	Wertebereiche der Mensch-Roboter-Prozesseffizienz und deren Interpretation . . . . .	83
4.6	Empfehlungen für die interaktive Prozessgestaltung zwischen Mensch und Roboter . . . . .	86
5.1	Fragen zur Bewertung der Reaktionszeit des Roboters . . . . .	93
5.2	Fragen zur Erfassung der subjektiven Wahrnehmung der Gestensteuerung . . . . .	98
5.3	Versuchsplan des Experiments zur Ermittlung der Reaktionszeit des Roboters mittels Sprachsteuerung in Abhängigkeit der Faktoren Umgebungslautstärke und Sprachanweisung (N=14) . . . . .	102

5.4	Fragen zur Erfassung der subjektiven Wahrnehmung der Robotersteuerung per Sprache . . . . .	104
5.5	Testergebnisse der Reaktionszeit in Abhängigkeit der Faktoren Umgebung und Sprachanweisung mittels Friedman-Test (N=9). . . . .	106
5.6	Faktoren und deren Abstufungen zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit der Informationsmodule . . . . .	114
6.1	Mittels MTM-1-Methode bestimmte Planzeit der Montagekonzepte in Abhängigkeit der Robotersteuerung . . . . .	134
6.2	Theoretische Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte . . . . .	135
6.3	Unabhängige Variablen und Faktorstufen zur Untersuchung der Prozessinteraktionssystematik . . . . .	138
6.4	Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Faktoren Montagekonzept, Robotersteuerung und Informationsmodul auf die Zielgrößen Prozesszeit und Ergonomie . . . . .	140
6.5	Testergebnisse der Prozesszeitdaten unter dem Einfluss der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung mittels des Friedman-Tests (N=24). . . . .	150
6.6	Post-Hoc Vergleich der Prozesszeit in Abhängigkeit des Faktors Montagekonzept über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert . . . . .	152
6.7	Post-Hoc Vergleich der Prozesszeit in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert . . . . .	152
6.8	Post-Hoc Vergleich der Prozesszeit in Abhängigkeit der Interaktion der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert . . . . .	153
6.9	Vergleich der theoretisch ermittelten MTM-Zeitwerte und den experimentell gemessenen Prozesszeiten . . . . .	155

6.10	Einordnung der durchschnittlichen Zeitanteile von Mensch und Roboter entsprechend der Prozessinteraktionssystematik . . . .	156
6.11	Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte . . . . .	158
6.12	Testergebnisse des Belastungsindex unter dem Einfluss der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung mittels des Friedman-Tests (N=24). . . . .	159
6.13	Post-Hoc Analyse des Belastungsindex in Abhängigkeit des Faktors Montagekonzept über den Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert . . . . .	160
6.14	Post-Hoc Vergleich des Belastungsindex in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert . . . . .	161
6.15	Post-Hoc Vergleich des Belastungsindex in Anhängigkeit der Interaktion der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert . . . . .	162
6.16	Testergebnisse der Prozesszeitdaten unter dem Einfluss der Informationsmodule sowie deren Interaktionseffekte mit den Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung mittels des Friedman-Tests (N=12). . . . .	164
6.17	Angepasste MTM-Zeitwerte der Montagekonzepte . . . . .	174
6.18	Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte . . . . .	176
6.19	Versuchsplan des Probandenexperiments zur Untersuchung des Einflusses der Faktoren optimiertes Montagekonzept und Robotersteuerung auf die Zielgröße Prozesszeit . . . . .	187
6.20	Testergebnisse der Prozesszeitdaten unter dem Einfluss der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung mittels des Friedman-Tests (N=8). . . . .	191

6.21	Post-Hoc Vergleich der Prozesszeit in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung über zweiseitigen Wilcoxon Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert . . . . .	193
6.22	Vergleich der theoretisch ermittelten MTM-Zeitwerte und der experimentell gemessenen Prozesszeit . . . . .	195
6.23	Durchschnittliche Zeitanteile von Mensch und Roboter entsprechend der Prozessinteraktionssystematik . . . . .	196
6.24	Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte . . . . .	209
A.1	OWAS-Kodierung der Körperhaltung (Figali et al., 2015) . . .	248
A.2	Übersicht über die Aktionskategorien der OWAS-Methode (Gudehus, 2009) . . . . .	248
A.3	Bewertungslogik für die Evaluation von Anwendungsfällen .	249
A.4	Potentielle, industrielle MRI-Applikationen zur Klassifizierung und Ableitung generischer Szenarien . . . . .	250

# Abkürzungsverzeichnis

ATL	Abgasturbolader
AG	Aktiengesellschaft
AZM	Aktive Zeit des Menschen
AZR	Aktive Zeit des Roboters
BE	Bewertungseinheit
BMW	Bayrische Motorenwerke AG
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
EAWS	European Assembly Worksheet
EFFIROB	Effiziente innovative Servicerobotik
GZA	Gleichzeitige Aktivität
HMM	Hidden Markov Model
HS	Hohlschraube
IAP	Interaktionsarbeitsplatz
ifab	Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation
IZM	Inaktive Zeit des Menschen
IZR	Inaktive Zeit des Roboters
K0	Referenzkonzept
K1	Handlingskonzept
K1	Logistikkonzept
K3	Kombikonzept
K1 <sub>opt</sub>	Optimiertes Handlingskonzept
K3 <sub>opt</sub>	Optimiertes Kombikonzept
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KML	Kühlmittelschlauch
L	Lundqvist-Index
LBR	Leichtbauroboter
M	Median
MCI	Mensch-Computer-Interaktion

MIT	Massachusetts Institute of Technology
LMM-mA	Leitmerkmalsmethode manuelle Arbeitsprozesse
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MPE	Menschliche Prozesseffizienz
MRI	Mensch-Roboter-Interaktion
MRPE	Mensch-Roboter-Prozesseffizienz
MRS	Mensch-Roboter-Schnittstelle
MTM	Methods of Time Measurement
MTM-UAS	MTM-Universelles-Analysier-System
MW	Mittelwert
N	Stichprobengröße
NLP	Natural Language Processing
OCRA	Occupational Risk Assessment
OWAS	Owaku Working Posture Analysis System
PAAK	Prozentualer Anteil der Aktionskategorie
PeSR	Personal Service Robotik
PIE	Prozessinteraktionseffizienz
PIS	Prozessinteraktionssystematik
PrSR	Professional Service Robotik
PS	Prozessschritt
RPE	Roboter-Prozesseffizienz
PVZ	Prozessverzögernder Zeitanteil
PZ	Prozesszeit
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
ÖRL	Ölrücklaufleitung
V	Teststatistik
TMU	Time Measurement Unit
TS	Torx-Schraube
UR	Universal Robots
UR5	Universal Robots 5-Roboter

UR10	Universal Robots 10-Roboter
ZDI	Zeit direkter Interaktion
ZII	Zeit indirekter Interaktion



# 1 Einleitung

Zu Beginn des Kapitels wird die Ausgangssituation von automatisierten Systemen im Automobilbau geschildert, wobei insbesondere auf die Herausforderungen im Bereich der Montage und der Mensch-Maschine-Interaktion eingegangen wird. Auf Basis dessen wird im zweiten Abschnitt die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit erläutert. Den Abschluss des Kapitels bildet die Kurzbeschreibung der gewählten Vorgehensweise.

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

In Deutschland produzierende Unternehmen stehen durch den demographischen Wandel, den steigenden globalen Wettbewerb und die erhöhte Volatilität der Märkte vor multiplen Herausforderungen (Lüder, 2014; Kühnle, 2007). Wechselnde politische Systeme sowie unterschiedliche und sich regelmäßig ändernde Regularien der Länder (FAZ Wirtschaft, 2016) machen es für global agierende Unternehmen zudem schwerer, verlässlich in die Zukunft zu planen. In Zusammenhang mit der steigenden Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten und der damit wachsenden Anzahl an Varianten, steht speziell das Produktionssystem der Automobilindustrie vor neuen Anforderungen (Holweg & Pil, 2004). Die Abkehr von der Massenproduktion hin zur Diversifizierung erfordert flexible und wandlungsfähige Produktionssysteme, die es ermöglichen, eine langfristig rentable Produktion in Hochlohnländern zu realisieren (Deuse, Weisner, Hengstebeck & Busch, 2015; Lüder, 2014).

Bedingt durch die technische Entwicklung in Sensorik, Robotik und intelligenten Systemen (Acatech, 2016), stehen heute Technologien zur Verfügung, die ein intelligentes Produktionssystem im Kontext der sog. *Smart Factory* ermöglichen. Nach Deuse, Weisner, Hengstebeck und Busch (2015) wird ein solches, zukünftiges Produktionssystem mit integrierter Informations- und Kommunikationstechnologie als *Cyber-Physisches Produktionssystem*

(CPPS) bezeichnet. Dieses hat eine flexiblere, nachhaltigere und effizientere industrielle Produktion in einem dynamischen Umfeld als Zielbild (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013). Da der Einsatz intelligenter Maschinen eine flächendeckende Vernetzung sowie eine Anpassung der bisherigen Prozessabläufe erfordert, wandelt sich die Rolle des Menschen im Produktionssystem (Mayer & Panthöfer, 2014; Byrnes, 2016). Auf der einen Seite steigen, bedingt durch die autonomen Systeme und das dynamische Produktionsumfeld, die Anforderungen an die Fähigkeiten der Mitarbeiter (Brynjolfsson & McAfee, 2015), die die Erwerbsstruktur aufgrund der resultierenden Nachfrage nach Fachkräften verändern wird. Auf der anderen Seite gilt es, den Menschen mittels neuer Technologien durch kollaborative Arbeitsformen zu unterstützen und dessen Fähigkeiten zu erweitern. Im Gegensatz zum Ansatz des *Computer-Integrated Manufacturing* stellt der Mensch in dem flexiblen Gesamtsystem eine elementare Größe dar. Seine Kompetenzen zur Steuerung und Sicherstellung der Flexibilität werden weiterhin benötigt (Schließmann, 2014). Zudem stehen vor dem Hintergrund der älter werdenden Belegschaft neben dem zukünftig wichtigen Faktor Personalmanagement und -entwicklung unterstützende Assistenzsysteme im Fokus, die den Menschen in der sich wandelnden Produktionsumgebung geistig wie körperlich entlasten sollen (Deuse, Weisner, Hengstebeck & Busch, 2015).

Wird ein CPPS auf die Automobilmontage mit ihrem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten übertragen (Holweg & Pil, 2004), ergibt sich ein Produktionsszenario in dem die Mensch-Maschine-Interaktion ein Kernelement darstellt. Der Mensch interagiert in symbiotischer Weise mit mobilen, intelligenten Assistenzsystemen ohne Montageband und Fixpunkte, wobei sich die jeweiligen Stärken von Mensch und Maschine optimal ergänzen. Bix (2016) entwirft dieses Szenario schemenhaft in seiner Produktionsvision, die in Abbildung Abb. 1.1 visualisiert ist. Einen ähnlichen Ansatz eines radikal neuen Konzepts in der Automobilfertigung verfolgt die Audi AG mit der *Smart Factory* (Audi Smart Factory, 2016) sowie der Forschungscam-

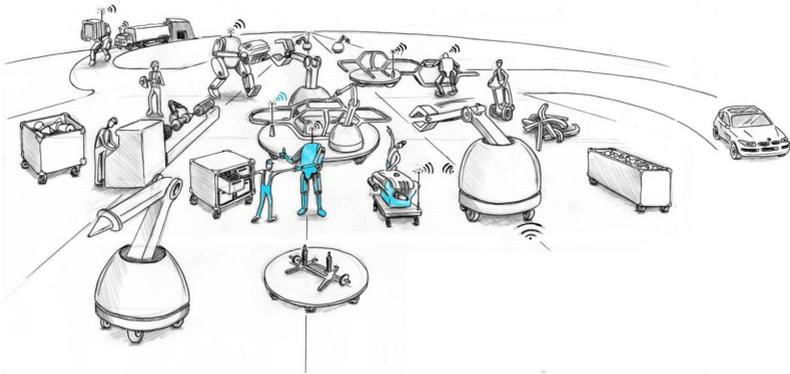


Abb. 1.1: Vision einer zukünftigen Automobilproduktion nach Bix (2016) in der Mensch und autonome, vernetzte Systeme mit einem gemeinsamen Ziel kollaborieren.

pus *Active Research Environment for Next Generation of Automobiles* der Universität Stuttgart (ARENA2036, 2017).

Eine Kerntechnologie im Bereich der Assistenzsysteme ist die Mensch-Roboter-Interaktion. Diese ermöglicht die ergonomischere Gestaltung von Arbeitsprozessen, da repetitive Handhabungs- und Bearbeitungsaufgaben in der Montage auf den Roboter übertragen werden und der Mensch sich auf seine Stärken konzentrieren kann (Economist, 2013). Bei der BMW Group und anderen Automobilherstellern sind bereits einige Anlagen umgesetzt (Economist, 2013; Krix, 2015), die meist in koexistenter Form ausgelegt sind und einen dementsprechend geringen Interaktionsbedarf besitzen. Um die Potentiale des beschriebenen CPPS Konzepts in der Montage zu realisieren, bedarf es einer Arbeitsraumerweiterung der Roboter. Diese schafft Interaktionsmöglichkeiten, damit Menschen und Roboter im gemeinsamen Arbeitsraum effektiv zusammenarbeiten können. Zudem wird durch die Mensch-Roboter-Interaktion ein höherer Grad an Automatisierung in der Montage erreicht, der aufgrund der hohen Anforderung an die Flexibilität der Prozesse bisher nicht realisierbar war (Holweg & Pil, 2004).

## 1.2 Zielsetzung

Die Einführung eines CPPS wie es Deuse, Weisner, Hengstebeck und Busch (2015) definieren, führt in der Automobilmontage zu einer Überschneidung der Arbeitsbereiche von Mensch und Maschine. Da sich die höhere Flexibilität nur realisieren lässt, wenn diese auf die Arbeitskräfte abgestimmt ist (Holweg & Pil, 2004), ist für die Vision einer Smart Factory (vgl. Abb. 1.1), neben der Entwicklung von technischen Systemen zur bidirektionalen Interaktion mit dem Menschen, auch die Gestaltung der Kollaboration im Produktionsumfeld zu definieren.

Zielsetzung dieser Arbeit ist, eine Methodik zu entwickeln, anhand der die kollaborative Prozessgestaltung von Mensch und Roboter in der Montage analysiert und optimiert werden kann. Dies beinhaltet zudem die Konzeption und Entwicklung von Mensch-Roboter-Schnittstellen, um die Interaktion beider Partner zu ermöglichen.

## 1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit teilt sich in einen theoretischen und einen experimentellen Teil auf, deren inhaltliche Struktur in Abbildung Abb. 1.2 dargestellt ist. Das erste Kapitel beinhaltet die thematische Einführung und stellt die Zielsetzung sowie die Gliederung der Arbeit vor.

In Kapitel 2 wird auf die theoretischen Grundlagen der Montage, deren Spezifika im Automobilbau und die Grundlagen der Robotik eingegangen. Zudem werden Methoden zur Prozessanalyse vorgestellt, die die Basis für die entwickelte Methodik bilden. Die Präsentation des Stands der Forschung schließt das Kapitel ab. Die Bedarfsanalyse in Kapitel 3 ermittelt das Potential interaktiver Roboterapplikationen, ordnet dieses in den Kontext des Forschungsbedarfs ein und zeigt den abgeleiteten Handlungsbedarf auf. Kapitel 4 stellt darauf aufbauend die Konzepte der Mensch-Roboter-Schnittstellen und die Methodik zur Analyse interaktiver Prozesse vor, womit der theoretische

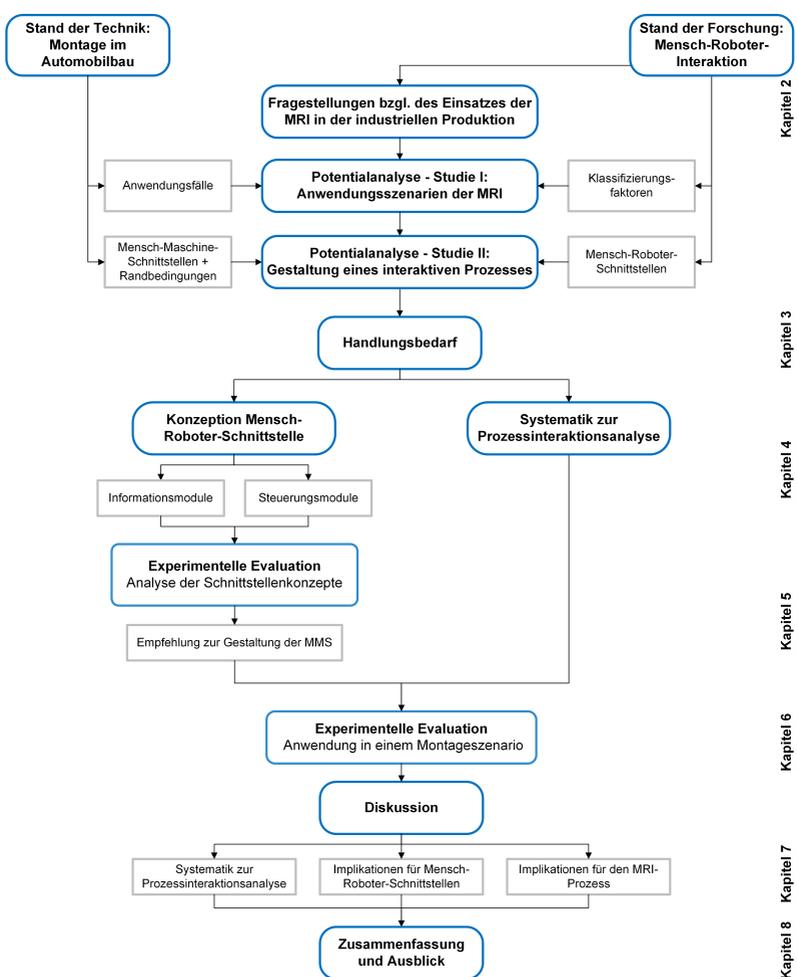


Abb. 1.2: Struktur der vorliegenden Arbeit.

Teil der Arbeit schließt (vgl. Abb. 1.2). Die Evaluation der Schnittstellenkonzepte hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit in Kapitel 5 leitet in den experimentellen Teil der Arbeit über. Die Methodik zur Analyse interaktiver Prozesse wird in Kapitel 6 über zwei Versuche evaluiert und deren Aussagen

verifiziert. Basierend auf den Resultaten wird in Kapitel 7 die Eignung der Schnittstellen sowie die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik diskutiert. Daraus folgen Implikationen zu Prozess und Schnittstellengestaltung für die Anwendung der Mensch-Roboter-Interaktion. Kapitel 8 bildet mit der Zusammenfassung und dem Ausblick auf weitere Forschungsfragen den Abschluss der Arbeit.

## 2 Theoretische Grundlagen

Seit der Einführung von Industrierobotern in die Automobilproduktion ist deren Anzahl und Bedeutung kontinuierlich gestiegen. Beispielhaft für diese Entwicklung steht der Anteil an Robotern im Karosseriebau des BMW Werks in Spartanburg, der von 30 Prozent in den 90er Jahren auf aktuell 99 Prozent gestiegen ist (Byrnes, 2016). Im Gegensatz dazu ist die Montage bis heute von einem hohen Anteil manueller Tätigkeiten geprägt (Holweg & Pil, 2004). Da die Leichtbauroboter aufgrund der technischen Weiterentwicklung mittlerweile auch in der Montage eingesetzt werden können, ergeben sich für diese neue Potentiale im Bereich nicht ergonomischer, repetitiver Tätigkeiten (Byrnes, 2016). Um ein grundlegendes Verständnis der Robotik sowie der Prozesse in der Automobilfertigung zu schaffen, beinhaltet dieses Kapitel eine allgemeine Einführung in Montagesysteme und deren Einordnung in die Prozesskette des Automobilbaus. Anschließend folgt die Vorstellung bestehender Methoden der Prozessanalyse von Arbeitssystemen. Die Grundlagen der MRI werden über die Beschreibung der verschiedenen Interaktionsformen, die Einordnung in Anwendungsfelder und die Präsentation der technischen Grundlagen von Mensch-Maschine-Schnittstellen dargelegt. Auf Basis dessen, wird der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der MRI vorgestellt und Fragestellungen aufgezeigt, die in Bezug auf den Arbeitsprozess einer kollaborativen MRI in der industriellen Montage zu klären sind.

### 2.1 Montage

Ein industriell gefertigtes Gut besteht in der Regel aus mehreren Einzelteilen, die im Prozessabschnitt der Montage zu einem fertigen Produkt zusammengebaut werden. Die Grundoperationen, die durch den Menschen oder durch Maschinen durchgeführt werden, sind nach Lotter (2012a) das *Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren* sowie *Sonderoperationen*. Je

nach Gestaltung der Montage lassen sich drei Systeme unterscheiden: die manuelle, die hybride sowie die automatische Montage. Abbildung Abb. 2.1 zeigt die von Lotter (2012c) vorgenommene Einordnung in Abhängigkeit der Faktoren Variantenvielfalt, Flexibilität, Stückzahl und Produktivität. Nicht abgebildet ist der Investitionsbedarf, der mit einem ansteigenden Grad der Automatisierung korreliert und dementsprechend von der manuellen Montage bis zum automatischen System ansteigt.

Zielzustand der manuellen Montage ist es, eine anthropozentrische Arbeitsumgebung zu schaffen, in der Tätigkeiten vorherrschen, die der Mensch unter Zuhilfenahme seiner Sinne, Flexibilität und Intelligenz mittels Werkzeugen ausführen kann. Es ist auf eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung zu achten, um den Menschen bei seiner Arbeit zu entlasten und dessen Leistungsfähigkeit möglichst konstant zu halten (Lotter, 2012b).

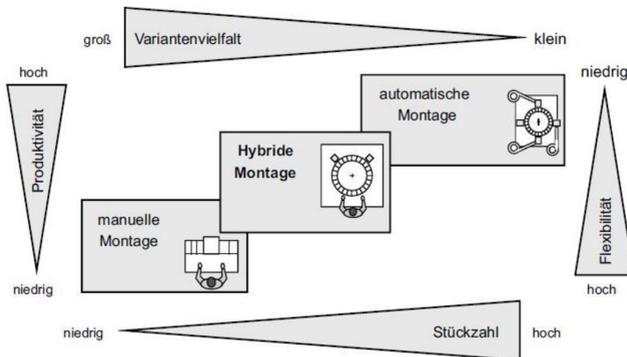


Abb. 2.1: Einordnung der manuellen, hybriden und automatischen Montagesysteme in Abhängigkeit der Faktoren Variantenvielfalt, Flexibilität, Stückzahl und Produktivität (Lotter, 2012c).

Die automatische Montage zeichnet sich durch ihre hohe Ausbringungsmenge bei konstanter Qualität aus. Diese wird durch den Einsatz spezieller Fertigungsmaschinen und durch Industrieroboter erreicht. Die dadurch bedingten höheren Investitionen sowie die Schwierigkeit komplexe Fertigungs-

und Handhabungsprozesse zu automatisieren, erfordern eine genaue Analyse der technischen Machbarkeit sowie der damit verbundenen Kosten (Hesse, 2012). Die hybride Montage bildet das Mittel aus beiden Systemen. Sie ermöglicht die Fertigung einer angemessenen Anzahl an Varianten bei höherer Flexibilität als in der automatischen Montage. Da der Mensch in der hybriden, wie in der manuellen Montage im Mittelpunkt steht, richtet sich die Entscheidung für eine hybride Montage nach Arbeitsinhalt und Komplexität des Montageprozesses, die Ausbringungsmenge ist zweitrangig (Lotter, 2012c).

### **2.1.1 Montage im Automobilbau**

In der Automobilfertigung stellt die Montage den letzten der vier Kernprozesse dar. Ausgehend von Stahl- und Aluminiumbändern, die im Presswerk bearbeitet werden, durchlaufen die gefertigten Einzelteile den Rohbau und werden zur Karosse zusammengefügt. Anschließend erfolgt die Oberflächenbehandlung in der Lackiererei, wonach die lackierte Karosse die Montage erreicht (BMW AG, 2016). Diese schließt die Automobilfertigung mit dem Einbau des Fahrwerks sowie des vom Kunden gewünschten Interieurs ab (Kropik, 2009). Während in den hochautomatisierten Produktionsabschnitten, wie Karosseriebau und Lackiererei, aufgrund der automatischen Montagen die getaktete Fließfertigung vorherrscht, basiert die Automobilmontage meist auf dem Ablaufprinzip der kontinuierlichen Fließfertigung. Diese ist durch stationäre Bearbeitungsstationen charakterisiert, die über Fördereinrichtungen miteinander verbunden sind (Schlick, Bruder & Luczak, 2010). Im Automobilbau wird zum Transport des Montageobjekts (Karosserie oder Motor) hauptsächlich ein Fließband eingesetzt, weshalb von Fließbandfertigung gesprochen wird. Das Fließband fördert das Montageobjekt kontinuierlich und ermöglicht damit die unmittelbare Aneinanderreihung der Bearbeitungsstationen sowie eine Taktung des Ablaufs (Schuh, Brosze & Brandenburg, 2012). Takt bezeichnet in diesem Zusammenhang die Dauer,

die das Montageobjekt von Anfang bis Ende einer Bearbeitungsstation benötigt (Schlick et al., 2012). In der Automobilindustrie ist diese in der Regel 60 Sekunden (Byrnes, 2016). Da angestrebt wird möglichst viele Fahrzeugmodelle über das gleiche Band laufen zu lassen, muss die Montage genügend Flexibilität aufweisen, um sowohl die Variantenvielfalt der Fahrzeugmodelle an sich, als auch deren optische und technische Überarbeitungen im Laufe des Produktlebenszyklus (mit geringfügigen Änderungen der bestehenden Strukturen) abbilden zu können (Kropik, 2009). Diese Anforderungen bedeuten einen hohen Aufwand für den Einsatz von automatischen Montagen, da sie zum einen eine meist manuelle Notstrategie als Absicherung gegen einen - durch die automatische Station bedingten - Bandstillstand und zum anderen ein stillstehendes Montageobjekt für den Bearbeitungsprozess erfordern. Die erforderliche Entkopplung des Montageobjekts aus dem Fließprozess wird meist über eine automatische Station realisiert (Bix, 2016), die einen Fixpunkt in der Montagelinie darstellt. Aufgrund dieser Umstände bildet die manuelle Montage das dominierende System in der Automobilmontage, in der alle genannten Grundoperationen zum Einsatz kommen. Bauteile werden aus den Behältern genommen und im Fahrzeug eingebaut (Handhaben, Fügen), gefügte Bauteile werden auf den korrekten Einbau kontrolliert und gegebenenfalls justiert. Sonderoperationen, wie Reinigen oder Ölen von Oberflächen, treten ebenfalls auf. Abbildung Abb. 2.2 zeigt exemplarisch zwei Fügeprozesse aus der Fahrzeugmontage.



Abb. 2.2: Fügeprozesse in der Fahrzeugmontage, das Verschrauben des Heckschlusses (links) und das Einrasten des Fahrzeugemblems (rechts) (BMW AG, 2016).

Der hohe Anteil an manuellen Tätigkeiten spiegelt sich im Automatisierungsgrad der Automobilmontage wieder, der im Vergleich zu den Produktionsabschnitten Karosseriebau und Lackiererei, mit 5-10% sehr niedrig ist (Brüninglinghaus, 2012).

Die Flexibilität des Produktionssystems im Automobilbau wird in den letzten Jahren immer wichtiger, da die zunehmende Produktvielfalt und die schwankenden Marktbedingungen eine schnellere Reaktionszeit erfordern (Barattini, Morand & Robertson, 2012; Matthias & Ding, 2013). Der Einsatz von hybriden Montagen ist ein Ansatz, bei dem die Flexibilität nahezu beibehalten und der Mensch durch das technische System unterstützt wird. Durch die Entwicklung von sicheren, sensitiven Leichtbaurobotern, die in hybriden Montagesystemen einsetzbar sind, ergeben sich für den Automobilbau sowie für Roboterhersteller neue Potentiale hinsichtlich dieser Flexibilität (Matthias & Ding, 2013). Die Arbeitsschritte werden den jeweiligen Stärken von Mensch (bspw. Handhabung biegeschlaffer, komplexer Bauteile oder Flexibilität) und Roboter (bspw. repetitives Handhaben schwerer Bauteile oder Möglichkeit der integrierten Prozesskontrolle) entsprechend aufgeteilt, um für beide Partner sowie das Produktionssystem eine optimale Prozessgestaltung zu gewährleisten.

### **2.1.2 Methoden der Prozessanalyse**

Die Planung und Bewertung eines Montageprozesses erfordert die Definition der Arbeitsinhalte sowie der zugehörigen Auftragszeiten. Diese basiert auf dem Montagevorranggraph, der den Prozess in seine Vorgänge unterteilt und die Reihenfolge der Prozessschritte festlegt. Die Bewertung des Montageprozesses kann anschließend auf quantitative und qualitative Weise erfolgen. Die Sichtweisen unterscheiden sich darin, dass sich die quantitative Bewertung auf die Prozessleistung bezieht und die qualitative auf Prozessfähigkeit sowie die Überprüfung bestimmter Merkmale des Prozesses (Becker, 2008). In dieser Arbeit fokussiert sich die qualitative Bewertung auf die

ergonomische Güte, die quantitative auf die Zeit zur Durchführung des Montageprozesses. Über letztere lässt sich eine Aussage über die Prozessleistung treffen.

### 2.1.2.1 Methoden zur zeitlichen Analyse von Arbeitsabläufen

Industrielle Montagetätigkeiten erfolgen unter der Vorgabe eines vorab definierten Zeitrahmens, der eine wirtschaftliche Produktion sicherstellt. Die Erfassung und Festlegung der anwendungsbezogenen Zeitdaten von Tätigkeiten ist Aufgabe der Zeitwirtschaft und Eingangsgröße in andere Unternehmensbereiche für (finanzielle) Analysen und Planungstätigkeiten (Olbrich, 1993).

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf Montagetätigkeiten deren Zeitdaten primär in Ist- und Sollzeit unterteilt werden. Die Istzeit wird als die Zeit definiert, die der Mensch oder die Maschine tatsächlich benötigen, um einen Arbeitsablauf durchzuführen (REFA, 1997). Die Sollzeit definiert eine Zeit, die die Ausführung einer Tätigkeit betragen soll (bspw. das Verschrauben einer Schraube). Sie basiert auf empirischen Istzeitwerten und dient der Planung von Montageprozessen. Grundlage für die Planung bildet die sog. Planzeit, die einem Zeitwert für definierte Arbeitsabläufe entspricht, der aus den jeweiligen prozessrelevanten Sollzeiten errechnet wird (bspw. das Fügen mehrerer Bauteile). Neue Arbeitsabläufe können auf Basis der Planzeit bewertet werden, womit es in der frühen Phase der Montageplanung möglich ist, Planungsalternativen zu vergleichen (Deuse & Busch, 2012). Um Montagetätigkeiten zeitlich zu bewerten, bestehen empirische Systeme vorbestimmter Zeiten. Beispiele für diese stellen die Methoden *Work Factor*, *Maynard Operations Sequence Technique* sowie *Methods Time Measurement* (MTM) dar. Letzteres ist das in Deutschland am meisten verwendete Verfahren (Deuse & Busch, 2012).

Für die Erfassung von Zeiten mittels der MTM-Methodik bestehen mehrere Analyseverfahren, die alle auf dem MTM-1 Grundverfahren beruhen.

Dieses unterteilt einen Montageprozess in die fünf Grundbewegungen, das *Hinlangen*, *Greifen*, *Bringen*, *Fügen* und *Loslassen*. Je nach Art der Bewegung, werden dieser in Abhängigkeit der benötigten Bewegungslänge (Entfernung), Zugänglichkeit und Kraft definierte Zeitwerte zugewiesen. Die Gesamtdauer setzt sich additiv aus den einzelnen Werten zusammen und basiert auf sog. *Time Measurement Units* (TMU), die die kleinste Einheit darstellen. Eine TMU entspricht 0.036 Sekunden (MTM Datenkarte, 2008). Ergänzend zu den Grundelementen werden die Bewegungsarten *Drücken*, *Trennen*, *Drehen*, *Körper-*, *Bein-* und *Fußbewegungen* sowie *Blickfunktionen* erfasst. Auch deren Zeitwerte basieren auf TMU und werden in Abhängigkeit der Entfernung, die die Hand zurücklegen muss, und Einflussgrößen, wie z.B. die Schwierigkeit der Handhabung, bestimmt. Mit dieser Methodik ist es möglich, manuelle Montageprozesse universell und detailliert in die oben genannten Grundelemente aufzuteilen und diese auf Basis von einheitlichen Zeitwerten zu analysieren. Der Vorteil des MTM-Verfahrens ist, dass über die Kodierung der Bewegungen ein einheitlicher, weltweiter Standard genutzt wird, der es ermöglicht, jede Änderung im Arbeitsprozess zeitlich nachzuvollziehen. Prozesse können dadurch im Vorhinein geplant und bewertet werden (Schlick, Bruder & Luczak, 2010).

Die MTM-1 Methode bildet die Grundlage der zeitbezogenen Analyse einer hybriden Montagegestaltung von Mensch und Roboter, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt und untersucht wird. Diese wird um den Roboter als Teilnehmer im Arbeitssystem erweitert und in Kap. 4 detailliert vorgestellt. Neben MTM-1 bestehen weitere Analyseverfahren, wie das *MTM-Universelles-Analysier-System* (MTM-UAS), die auf diesem aufbauen. Letzteres arbeitet mit vereinfachten Grundvorgängen, die eine geringere Detailschärfe besitzen und deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht herangezogen werden. Beispielsweise werden Unterschiede in Entfernungen nicht berücksichtigt und Grundelemente wie *Hinlangen*, *Greifen*, etc. in einem Vorgang *Aufnehmen und Platzieren* integriert.

### 2.1.2.2 Methoden zur ergonomischen Analyse von Arbeitsabläufen

Die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung in der manuellen Montage dient dem Schutz der Gesundheit des Menschen und der Verbesserung seiner Leistungsfähigkeit (Lotter, 2012c). Die Erfassung von Daten zur Analyse von Arbeitssystemen kann grundsätzlich über vier verschiedene Verfahren realisiert werden. Diese sind die Beobachtung, die Befragung und die physiologischen sowie die physikalisch-chemischen Messverfahren (Schlick, Bruder & Luczak, 2010). Diese Arbeit fokussiert sich auf energetisch-effektorische Arbeitsvorgänge (Inanspruchnahme der Muskulatur, um Kräfte zu generieren und Bewegungen auszuführen) die in der manuellen Montage auftreten, und analysiert diese auf Basis von Methoden der Beobachtung, die in bestimmten Bereichen durch Befragung ergänzt werden. Für die Evaluation des Effekts von Tätigkeitsbedingungen auf den Menschen wird das *Belastungs-Beanspruchungs-Konzept* nach Rohmert (1984) zugrunde gelegt. Aus diesem folgt, dass unter *Belastung* Faktoren definiert werden, die im Arbeitssystem von außen auf den Menschen einwirken (z.B. Lärm oder Zeitdruck), und unter *Beanspruchung* individuelle Reaktionen des Menschen (physischer und psychischer Art), die durch die Belastungen hervorgerufen werden (Rohmert, 1984).

Die Grundlage der Bewertungssystematik von Arbeitssystemen durch Beobachtung bildet die Annahme, dass primär die Anteile statischer Haltungs- und Haltearbeit zu Erkrankungen des Stütz- und Bewegungsapparates führen und falsche Körperhaltungen Krankheiten des Skeletts, der Muskeln sowie des Bindegewebes hervorrufen (Lawaczeck, 2000). Im Folgenden wird eine Auswahl an Verfahren vorgestellt, die auf dieser Annahme basieren und die Risiken für die Gesundheit über verschiedene Faktorenkombinationen bewerten. Der Fokus liegt auf praxis- und personenorientierten Verfahren der Belastungsbewertung über Beobachtung (sog. *Screening-Verfahren*), die eine schnelle Evaluation und eine klare Ergebnisdarstellung ermöglichen

und vielfach in der Industrie zur Bewertung von Montagearbeitsplätzen eingesetzt werden (Schlick, Bruder & Luczak, 2010). Alle Verfahren basieren auf einem Verrechnungssystem von Belastungspunkten, die in Abhängigkeit der Belastungssituation (z.B. Höhe, Dauer und/oder Körperhaltung) vergeben werden, und können manuell auf Papierbasis durchgeführt werden.

#### *European Assembly Worksheet (EAWS)*

Das EAWS ist ein weit verbreitetes Screening-Verfahren, das die Bewertung der Haltung des gesamten Körpers und die der oberen Extremitäten bei repetitiver Tätigkeit kombiniert. Die Gesamtbewertung basiert auf der Summierung der Belastungsbewertung von Körperhaltung, Aktionskräften, Handhabung von Lasten und repetitiven Tätigkeiten auf Basis von Punktwerten. Die resultierende Wertung wird anhand eines Dreizonenmodells (Ampelschema) nach EU-Maschinenrichtlinie eingeordnet und dient zur Einstufung des Risikos (Schlick, Bruder & Luczak, 2010).

#### *Occupational Risk Assessment (OCRA)-Checkliste*

Die OCRA-Checkliste evaluiert Belastungen der oberen Extremitäten von repetitiven Tätigkeiten. Anhand der Summe von Punktwerten der fünf Bewertungskategorien Erholung, Frequenz, Kraft, Haltung sowie zusätzlicher Faktoren ergibt sich die Gesamtbewertung. Diese wird anhand eines Ampelschemas bzgl. des Risikos der Tätigkeit eingestuft (Kunze, 2019).

#### *Leitmerkmalmethode manuelle Arbeitsprozesse (LMM-mA)*

Die LMM-mA bewertet Tätigkeiten mit Belastung auf den Hand-Arm-Schulter-Bereich. Über die Bewertung der Dauer, des Kraftaufwands, der Greifart, der Haltung des Körpers sowie von Arbeitsumweltfaktoren auf Basis von Punktwerten ergibt sich die Gesamtbewertung. Diese wird anhand eines Ampelschemas ausgewertet (BauA, 2019).

### *Rapid Upper Limb Assessment (RULA)*

Das RULA Verfahren bewertet die Haltung des gesamten Körpers in den Kategorien Arm, Handgelenk, Oberkörper, Hals und Bein, wobei der Fokus auf Arm und Handgelenk liegt. Beide Kategorien erhalten ca. 50% der Bewertungspunkte. Neben der Haltung der Körperteile wird erfasst, ob Muskelarbeit bei statischer Haltung oder repetitive Tätigkeiten geleistet werden. Daraus folgt ein Gesamtpunktwert, der über eine Tabelle das Risiko der Tätigkeit einordnet (Gudehus, 2009).

### *Ovako Working Posture Analysing System (OWAS)*

Die OWAS Methode erfasst die während der Tätigkeit auftretende Haltung von Arm, Bein, Rücken und Kopf, deren zeitlichen Anteil sowie auftretende Kräfte und bestimmt über ein Punktwertsystem die entstehenden Belastungen. Damit verbunden ist die Einteilung in sog. Aktionskategorien, die das Risiko einordnen (Gudehus, 2009).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die OWAS Methode zur Belastungsanalyse verwendet und im Folgenden ausführlicher beschrieben. Das Verfahren wird gewählt, da die Erfassung der Haltung des gesamten Körpers in gleicher Gewichtung sowie die Möglichkeit der vollständigen Datenerhebung über ein Motion-Capturing-System gegeben ist. Die OWAS Methode wurde in den siebziger Jahren von Osmo Karhu entwickelt und basiert auf der Erfassung aller Körperhaltungen innerhalb eines Prozesses sowie deren zeitlichem Anteil. Ziel der Methode ist die einfache und eindeutige Evaluation sowie die Verbesserung von bestehenden und zukünftigen Arbeitsprozessen (Gudehus, 2009). Für die Aufzeichnung der Körperhaltungen stehen zwei Varianten zur Verfügung: das manuelle Ausfüllen eines Arbeitsbogens (Beobachtung durch den Menschen) oder die Analyse über ein Motion-Capturing-System. Letzteres erfasst die Körperhaltung des Menschen kontinuierlich und bietet eine automatisierte Datengenerierung in hoher Frequenz. Aus den Daten werden die Belastungen für das Muskel-Skelett-System abgeleitet und in

eine Kodierung übertragen, die es erlaubt, den Risikostatus der einzelnen Körperbereiche über den Arbeitsprozess einzusehen. Der Risikostatus unterteilt sich in vier Aktionskategorien, die entsprechend ihrer Dringlichkeit nach Änderung abgestuft sind. Die Kodierung besteht aus vier bis fünf Kategorien, die die Haltung des Rückens, der Arme, der Beine und nach Bedarf auch des Kopfs beschreiben. Zudem wird das vom Werker handhabbare Gewicht in drei Kategorien aufgeteilt (<10, 10-20 und >20kg). Eine Übersicht der einzelnen Kategorien ist im Anhang in Tabelle A.1 angegeben. Die vier Aktionskategorien, aufgrund derer die kodierten Körperhaltungen zugeteilt werden, befinden sich ebenfalls im Anhang in Tabelle A.2. Die Zuteilung erfolgt über den zeitlichen Anteil der Körperhaltung am Gesamtprozess und in Abhängigkeit der Körperhaltung an sich (Gudehus, 2009). Abbildung Abb. 2.3 zeigt exemplarisch das Einordnungsschema der Aktionskategorie für den Bereich Rücken.

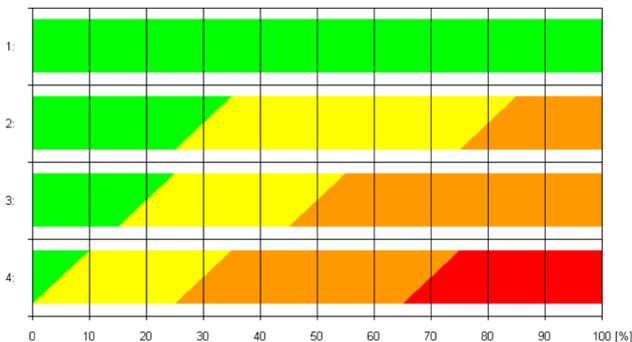


Abb. 2.3: Einordnungsschemata der OWAS-Aktionskategorien (grün=AK 1, gelb=AK 2, orange=AK 3, rot=AK 4) im Bereich Rücken, die Haltung des Rückens (y-Achse: 1=gerade, 2=gebeugt, 3=verdreht, 4=2 und 3 zur selben Zeit) wird den Aktionskategorien in Abhängigkeit des prozentualen Anteils an der Zeit (x-Achse) zugeordnet (Gudehus, 2009).

Darin zeigt sich ein fließender Übergang der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit des prozentualen Zeitanteils der Haltung. Ein gerader Rücken (Kodierung 1) führt zum Beispiel bei 100% Anteil zu Kategorie 1, während

ein gedrehter bereits nach 10-15% in Kategorie 2 fällt (gelb dargestellt). Um den Arbeitsprozess ergonomisch zu bewerten, werden die einzelnen Aktionskategorien über einen Belastungsindex verrechnet, der in Abhängigkeit der Prozesszeit den Wert der Belastungen angibt. Der Index trifft so eine Aussage über die Beanspruchung des Körpers durch den Arbeitsvorgang. Zur Berechnung des Index steht u.a. die Methode nach Lundqvist zur Verfügung, die auf einer Ordinalskala zwischen 100 und 400 basiert. Der Lundqvist-Index berechnet sich aus der Summe der Produkte der prozentualen Anteile der Aktionskategorien (Bereich 0-100) sowie deren Faktor (Gudehus, 2009). Die folgende Gleichung zeigt die Berechnung, wobei  $L$  für den Lundqvist-Index und  $PAAK\#$  für den prozentualen Anteil der Aktionskategorien eins bis vier steht.

$$L = PAAK1 + 2 \cdot PAAK2 + 3 \cdot PAAK3 + 4 \cdot PAAK4$$

### 2.2 Mensch-Roboter-Interaktion

Das Forschungsfeld der Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) ist im Vergleich zu anderen Disziplinen der Wissenschaft relativ jung. Neben der Mensch-Computer-Interaktion (MCI) stellt die MRI einen Unterbereich der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) dar. Letztere befasst sich, unter Einbeziehung menschlicher Faktoren, mit allen Gesichtspunkten der Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Das Feld der MRI legt den Fokus auf die Interaktion des Menschen mit dem Roboter (Goodrich, McLain, Anderson, Sun & Crandall, 2007) und besteht laut Goodrich und Schultz (2007) seit Mitte der 90er Jahre als eigenständige Disziplin. Trotz der Ähnlichkeit zu MMI und MCI unterscheidet sich die MRI hauptsächlich darin, dass technische Systeme (Roboter) mit komplexer, dynamischer Steuerung betrachtet werden, die in sich ändernden, realen Umgebungen autonom agieren können (Fong, Thrope & Baur, 2003). Die Art der Interaktion gestaltet sich somit

variabel und hängt von der Funktion des Roboters sowie dem Verhältnis des Menschen zu diesem ab (Scholtz, 2003). Einen Ausgangspunkt für eine übergreifende Definition der applikationsabhängigen Interaktionsarten bildet die soziale Interaktion, die nach Vester (2019) besagt, dass die Interaktion ein gegenseitiges Aufeinanderabstimmen von Handlungen der beteiligten Akteure darstellt. Bis heute befinden sich die meisten Roboter im industriellen Einsatz und führen, ohne nennenswerte Sensorik, repetitiv die gleiche Bewegung beim Fügen oder Handhaben von Bauteilen aus (Thrun, 2004). Dieser Einsatzbereich, in dem die Roboter durch Schutzzäune vom Menschen getrennt agieren, beschränkt die Interaktion lediglich auf die Programmierung bei der Einrichtung des Systems. Der technische Fortschritt und die gleichzeitig sinkenden Kosten für Sensorik und Rechenleistung ermöglichen die Entwicklung einer neuen Generation von sog. Servicerobotern, die den Menschen in seiner Freizeit oder bei der Arbeit unterstützt (Thrun, 2004). Durch die damit einhergehende Überschneidung der Aktionsbereiche von Mensch und Roboter stellt sich die Frage, wie die Interaktion für beide Seiten optimal zu gestalten ist. Um ein grundlegendes Verständnis der MRI zu schaffen, wird im Folgenden auf Interaktionsformen aus der Sichtweise von Wissenschaft und Industrie eingegangen und der Begriff der Interaktion definiert. Anschließend werden Bereiche der MRI anhand ihrer Einsatzfelder klassifiziert und der Stand der Technik zu Mensch-Roboter-Schnittstellen (MRS) erläutert.

### **2.2.1 Formen der Mensch-Roboter-Interaktion**

Anhand verschiedener Ansätze der Literatur erläutert dieser Abschnitt die Rolle des Menschen in der MRI und definiert den Begriff der Interaktion. Daran anschließend werden die in der Industrie gebräuchlichen Interaktionsbegriffe vorgestellt und in Relation zueinander gesetzt.

### 2.2.1.1 Allgemeine Definition der Interaktion von Mensch und Roboter

Im Rahmen einer MRI kann der Mensch auf unterschiedliche Weise mit dem Roboter in Interaktion treten. Scholtz (2003) definiert drei verschiedene Rollen des Menschen. Dieser kann als *Aufseher*, als *Ebenbürtiger Partner* oder als *Mechaniker / Ingenieur* auftreten. Die Rolle des ebenbürtigen Partners lässt sich in die Form eines Arbeitskollegen oder eines unbeteiligten Beobachters unterteilen. Ebenso die des Mechanikers in einen, der mit den internen, oder den externen Komponenten des Roboters, interagiert. Goodrich und Schultz (2007) bauen auf dieser Klassifikation auf und ergänzen sie um die Rolle des *Informationskonsumenten*, womit sechs unterschiedliche Klassen bestehen, die in Abbildung Abb. 2.4 skizziert sind. Wie Goodrich und Schultz (2007) anhand von Beispielen aufzeigen und Burke, Murphy, Rogers, Lumelsky und Scholtz (2004) in den drei Beziehungen numerisch, räumlich und autoritätsbasiert darstellen, wird die Rolle des Menschen durch die Interaktionsform mit dem Roboter und diese vom Anwendungsfeld des Roboters bestimmt. Somit passt sich die Form der Interaktion dem Einsatzszenario des Roboters an, in der es zur Kommunikation beider Seiten kommen kann aber nicht muss.

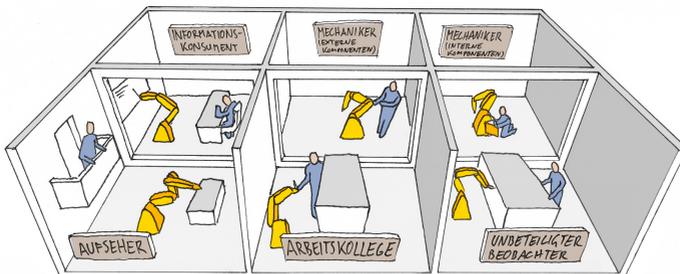


Abb. 2.4: Illustration der sechs Rollen des Menschen in der Mensch-Roboter-Interaktion (eigene Darstellung).

Takeda et al. (1997) definieren auf dieser Basis drei Interaktionsformen: Die *intimate interaction*, die einer direkten Interaktion zwischen Mensch und Roboter entspricht. Die *loose interaction*, die eine räumlich voneinander getrennte Interaktion beschreibt und die *co-operative interaction*, die eine Einbeziehung von mehreren Menschen und Robotern umfasst, sofern dies zur Erfüllung der Aufgabe benötigt wird. Thrun (2004) fasst die Interaktion in zwei Formen zusammen, die direkte und die indirekte Interaktion. Die direkte Interaktion ist mit dem Modell der *intimate interaction* vergleichbar. Die indirekte Interaktion bezeichnet bei Thrun (2004) eine Situation, in der der Mensch den Roboter steuert und dieser ihm Informationen bereitstellt. Diese kann den ersten beiden Formen von Takeda et al. (1997) entsprechen, das Auftreten ist bei der *loose interaction* jedoch wahrscheinlicher. Die dritte Form von Takeda et al. (1997) ist in die Definitionen von Thrun (2004) integrierbar und wird nicht weiter betrachtet. Beide Arten erfordern die Kommunikation der Partner, um ein aufeinander abgestimmtes Handeln zu realisieren. Da der Mensch auch in Form des unbeteiligten Beobachters mit dem Roboter in Interaktion treten kann, wird ein drittes Szenario, das der Koexistenz, ergänzt. In diesem befinden sich beide Partner in der gleichen Umgebung, jedoch ohne dass diese zwangsläufig aufeinander abgestimmt agieren. Es ist somit zwischen einer Interaktion mit oder ohne abgestimmte(r) Handlung zu differenzieren. Entsprechend lässt sich für die Interaktion folgende Definition ableiten:

Die *Interaktion* des Menschen mit dem Roboter bezeichnet das wechselseitige Einwirken beider Akteure, das die verbale und/oder non-verbale Kommunikation als Mittel zur Verständigung nutzt. In ihrer Ausprägung kann diese drei Formen annehmen: Die direkte Interaktion, in der beide Partner wechselseitig mit einem gemeinsamen Ziel auf die Handlungen des Anderen abgestimmt reagieren. Die indirekte Interaktion, bei der ein Partner die Handlungen seines Gegenübers koordiniert und steuert und die Koexistenz, bei der die Handlungen des jeweils Anderen wahrgenommen werden, jedoch nur im Einzelfall darauf reagiert wird.

### 2.2.1.2 Interaktionsformen in der Montage

Die Interaktionsformen von Mensch und Roboter in der industriellen Montage gleichen den im vorherigen Abschnitt definierten Ausprägungen. Diese sind maßgeblich durch die Umgebungs- bzw. Einsatzbedingungen von Industrierobotern und die bestehende Normung geprägt. Es werden vier Formen unterschieden, die in Abbildung Abb. 2.5 schematisch dargestellt sind und im Folgenden beschrieben werden. Die Mensch-Roboter-Koexistenz (mit (a) oder ohne trennende Schutzeinrichtung (b)), -Kooperation (c), und -Kollaboration (d). In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass in der Normung ausschließlich von Mensch-Roboter-Kollaboration gesprochen wird, die wiederum vier verschiedene Untergruppen aufführt (DIN EN ISO 10218, 2011).

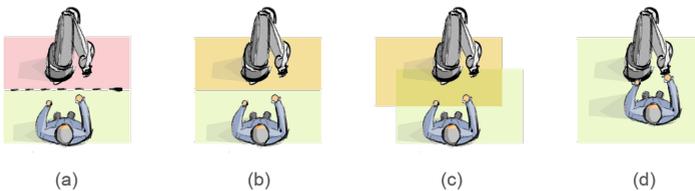


Abb. 2.5: Arten der Interaktion von Mensch und Roboter (eigene Darstellung). (a) Vollautomatation mit trennender Schutzeinrichtung, (b) Mensch-Roboter-Koexistenz mit getrennten Arbeitsräumen, (c) Mensch-Roboter-Kooperation (mit überschneidendem Arbeitsraum sowie gekoppelten Arbeitsfolgen) und (d) Mensch-Roboter-Kollaboration (mit überschneidendem Arbeitsraum, gekoppelten Arbeitsfolgen und gemeinsamer Aufgabe).

#### *Mensch-Roboter-Koexistenz*

Die Mensch-Roboter-Koexistenz ohne trennende Schutzeinrichtung bezeichnet die unabhängige und individuelle Arbeitsteilung im gleichen Arbeitsraum. In diesem besteht ein Mindestabstand und es findet keine Zusammenarbeit der beiden Partner statt, die sich auf ein gemeinsames Ziel bezieht (Henrich, Fischer, Gecks & Kuhn, 2008; Onnasch, Maier & Jürgensohn, 2016).

### *Mensch-Roboter-Kooperation*

Die Mensch-Roboter-Kooperation bezeichnet nach Shen (2015), Thiernemann (2005) und Bix (2016) die Tätigkeit von Mensch und Roboter in einen geteilten, gemeinsamen Arbeitsraum. Beide Partner haben ein übergreifendes gemeinsames Ziel, arbeiten zeitlich versetzt und aufeinander abgestimmt (Spillner, 2014; Schmidler, Knott, Hoelzl & Bengler, 2015).

### *Mensch-Roboter-Kollaboration*

Die Mensch-Roboter-Kollaboration bezeichnet die engste Form der Interaktion. Mensch und Roboter arbeiten im selben Arbeitsraum an einer gemeinsamen Aufgabe, bei der auch Unterziele gemeinsam verfolgt werden (Onnasch, Maier & Jürgensohn, 2016). Der Kontakt ist dabei in manchen Fällen vorgesehen und die Fähigkeiten von Mensch und Roboter werden optimal genutzt (Schmidler, Knott, Hoelzl & Bengler, 2015; Haag, 2015; Spillner, 2014).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die im vorherigen Abschnitt beschriebene Definition der MRI als Überbegriff über die drei Formen (Koexistenz, Kooperation und Kollaboration) verwendet. Prozesse mit direkter Interaktion werden mit dem Begriff der Mensch-Roboter-Kollaboration bezeichnet.

### **2.2.1.3 Anwendungsfelder**

Die anwendungsspezifische Einteilung der MRI kann, wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, anhand verschiedener Ausgangspositionen erfolgen. Ansätze zur Klassifizierung finden sich unter anderem bei Steinfeld et al. (2006), Dautenhahn (2007) oder Young et al. (2010). Ausgangspunkt für die anwendungsspezifische Klassifikation in dieser Arbeit ist die Einteilung nach Thrun (2004), der Robotersysteme den folgenden Anwendungsfeldern zuordnet.

### *Professional Service Robotik (PrSR)*

Ein Roboter der Klassifikation PrSR wird nach ISO 8373 (2012) als Serviceroboter definiert, der für eine kommerzielle Aufgabe genutzt und von einem geschulten Betreiber benutzt wird. Beispiele hierfür sind Roboter im Infrastruktur-, Militär- oder im medizinischen Bereich. Die Interaktion des Menschen mit dem Roboter kann in der Form stattfinden, dass dieser die Operation des Roboters startet, diese überwacht und wieder stoppt. Aufgrund ihrer Anwendungsfelder überwiegt in den PrSR die indirekte Interaktion. Koexistenz und direkte Interaktion sind jedoch nicht ausgeschlossen. In Abbildung Abb. 2.6 sind zwei Arten der PrSR dargestellt, das Chirurgierobotersystem *DaVinci* für minimalinvasive Operationen der Firma *Intuitive Surgical* (Maier, 2017) und der mobile Telepräsenzroboter *Beam Pro* der Firma *Suitable Technologies* (Suitable Technologies, 2017).



Abb. 2.6: Beispiele für Professional Service Roboter. (a) *DaVinci* Chirurgieroboter für minimalinvasive Operationen (Lauerer, 2013), (b) *BeamPro* mobiler Telepräsenzroboter den der Nutzer per Fernbedienung steuert (BlueOceanRobotics, 2017).

### *Personal Service Robotik (PeSR)*

Die PeSR umfasst Robotersysteme, die dem persönlichen, nicht-kommerziellen Nutzen eines Menschen dienen (ISO 8373, 2012). Dies umfasst Aufgaben im Pflege-, Unterhaltungs- und Dienstleistungsbereich. Der Mensch interagiert hauptsächlich direkt mit dem Roboter. Abbildung Abb. 2.7 zeigt, mit dem *Care-O-bot* des Fraunhofer Instituts IPA (Fraunhofer IPA, 2015) so-

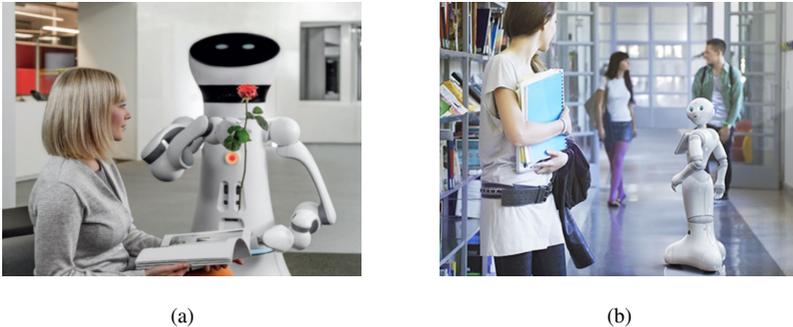


Abb. 2.7: Beispiele für Personal Service Roboter. (a) *Care-O-bot 4* Forschungsroboter des Fraunhofer IPA (Fraunhofer IPA, 2015), (b) Companion Roboter *Pepper* in der Funktion eines persönlichen Assistenten (SoftBank Robotics, 2017).

wie dem Roboter *Pepper* der Firmen Aldebaran Robotics SAS und SoftBank Mobile Corp., der 2014 als *Companion*-PeSR vorgestellt wurde (SoftBank Robotics, 2017), Beispiele für diese Roboterklasse.

### *Industrieroboter*

Ein Industrieroboter ist nach der ISO 8373 (2012), ein automatisch kontrollierter, frei programmierbarer und universell, statisch oder mobil einsetzbarer Manipulator mit drei oder mehr Achsen für den industriellen Einsatz. Die VDI Richtlinie 2860 ergänzt, dass die Roboter mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar sind, um ihre Fertigungsaufgaben auszuführen. Die klassischen Industrieroboter sind die bis heute am häufigsten vertretene Roboterklasse, die nach der Einführung des Unimate im Jahr 1960 einen großen kommerziellen Erfolg erzielt haben (Thrun, 2004). Aufgaben des Industrieroboters sind repetitive Füge- oder Handhabungsoperationen ohne den Einsatz von aufwendiger Sensorik. Aufgrund dieser Arbeitsinhalte ist die Interaktion auf eine schnelle Programmierung im Einrichtbetrieb und Instandhaltungstätigkeiten beschränkt. Abbildung Abb. 2.8 zeigt beispielhaft eine Roboterstraße im Rohbau eines Automobilwerks.

Außerhalb des „klassischen“ Einsatzes bestehen auch in dieser Roboterklasse MRI-Anwendungen, die vor allem die Ergonomie verbessern. Ein Beispiel hierfür sind Montageprozesse an einem vom Roboter gehaltenen Motorblock. Voraussetzung für eine derartige Anwendung ist der normgerechte Betrieb des Roboters im Betriebsmodus *sicherheitsgerichteter, überwachter Stillstand, Handführung* oder *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* (DIN EN ISO 10218, 2011).

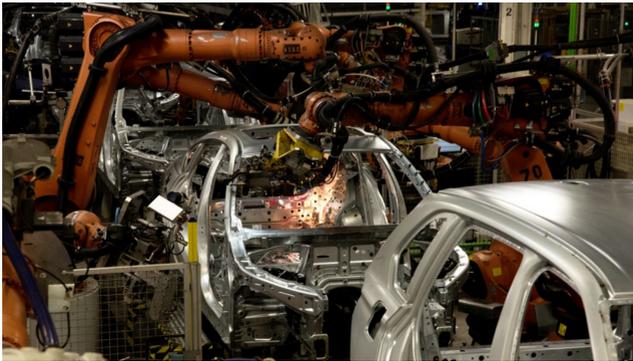


Abb. 2.8: Industrieroboter im Karosseriebau BMW Werk Spartanburg (Byrnes, 2016).

### *Kollaborative (Industrie-)Roboter*

Die technischen Grundlagen für die direkte Zusammenarbeit des Menschen mit einem Industrieroboter wurden durch die Entwicklung des sensitiven Leichtbauroboters (LBR) gelegt. Dieser wird nach Pershkin und Colgate (1999) als ein Apparat zur direkten physischen Interaktion zwischen dem Menschen und einem Allzweck-Manipulator bezeichnet. Der Unterschied zwischen dem oben beschriebenen klassischen Industrieroboter und einem sensitiven LBR besteht darin, dass in letzterem Sensorik integriert ist, die es dem Roboter erlaubt, Hindernisse wahrzunehmen und so in unmittelbarer Nähe des Menschen zu arbeiten (Haag, 2015). Des Weiteren sind die Roboter leichter, kleiner und haben ein verletzungsminimierendes Design. Die interne Sensorik ermöglicht den normkonformen Betrieb im *leistungs-* und

*kraftbegrenzten* Betriebsmodus nach DIN EN ISO 10218 (2011), wodurch der LBR eigenständig ohne trennende Schutz Einrichtung agieren kann. Die Anwendung ist im Einzelfall jedoch gesondert zu prüfen.

Der erste kommerziell verfügbare LBR war der UR5 von Universal Robots, der 2009 auf dem Markt eingeführt wurde (Universal Robots, 2017). Es folgten andere Hersteller wie zum Beispiel Rethink Robotics mit dem Baxter (Rethink Robotics, 2017) oder die KUKA AG mit dem LBR iiwa (KUKA, 2017), der aus dem Leichtbauroboter I des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt hervorging (DLR, 2017). Eine Übersicht zu weiteren kommerziellen Herstellern von LBR-Systemen gibt Robotiq (2018).

Zwischen Mensch und LBR sind alle Interaktionsformen möglich, sowohl die Koexistenz, als auch die Kollaboration (direkte Interaktion). In der Montage wird die Interaktionsform, entsprechend der Sicherheitsbestimmungen durch die Normung, anwendungsspezifisch gewählt. Beispiele für eine koexistente Form stellen die Anwendung zum Anrollen der Türschallisierung mittels eines kraftbegrenzten Leichtbauroboters (vgl. Abb. 2.9) oder das *Flexible Quality Gate* in den Werken der BMW Group dar (BMW Group Presse-Information, 2016). Im Anwendungsfall des Anrollens der Schallisierung übernimmt der Roboter das Anpressen der Isolierung, das einen hohen Kraftaufwand erfordert. Die Anwendung findet in der getakteten Türmontage ohne Schutzzaun statt. Das *Flexible Quality Gate* ermöglicht es, Qualitätsmerkmale an Motor oder Fahrzeug zu prüfen, die zuvor aufgrund von mangelnder Flexibilität klassischer Prüfsysteme nicht prüfbar waren (BMW Group Presse-Information, 2016). Als Beispiel für den Einsatz im kollaborativen Betrieb steht das sensitive Fügen von Kegelrädern im BMW Werk Dingolfing (KUKA DGF, 2019). Hierbei arbeitet ein KUKA iiwa Roboter an der Seite des Menschen und fügt ein Kegelrad in das entsprechende Lager.



Abb. 2.9: UR10 Roboter beim Anrollen der Türschallisolierung im BMW Werk Spartanburg (BMW AG, 2016).

### 2.2.2 Mensch-Roboter-Schnittstelle

Mit der Überschneidung der Aktionsbereiche von Mensch und Roboter gehen sowohl die freiwillige als auch die unfreiwillige Interaktion einher. Daher ist für die Akzeptanz und das Aufkommen einer sozialen Interaktion zwischen Mensch und Roboter wichtig, dass sich die Partner intuitiv verstehen und miteinander kommunizieren können. Die Möglichkeit der verbalen und/oder non-verbalen Kommunikation muss demnach von der Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. *human-machine interface*) gewährleistet werden. Der Informationsaustausch stellt in einem Arbeitssystem von Mensch und Roboter das zentrale Element der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) dar (Schlick, Bruder & Luczak, 2010). Dabei unterscheidet das MMS-Modell nach Schlick et al. (2010) die maschinelle Informationsausgabe und die menschliche Informationsabgabe. Über die maschinelle Informationsausgabe stellt die MMS dem Menschen Informationen zur Verfügung, mit deren Hilfe er den Zustand der Maschine (Roboter) erfasst. Über die Bereitstellung von Eingriffsmodulen zur menschlichen Informationsabgabe stellt diese sicher, dass der Mensch den Zustand beeinflussen kann.

Zur Wahrnehmung der maschinellen Informationen stehen dem Menschen nach Schlick et al. (2010) theoretisch neun sensorische Systeme, sog. *Modalitäten*, zur Verfügung. Die für eine MMS wichtigsten fünf Modalitäten definiert Zühlke (2012) als das visuelle, auditive, haptische, olfaktorische sowie vestibuläre Wahrnehmungssystem, wobei für den industriellen Einsatz nur die ersten drei Modalitäten genutzt werden. Da die Wahrnehmung des Menschen natürlichen Grenzen sowie externen Einflussfaktoren unterworfen ist, ist bei der Gestaltung der MMS in einer industriellen Umgebung auf eine Orientierung gemäß den Eigenschaften des Menschen zu achten. Dies stellt eine optimale Informationsaufnahme und -verarbeitung sicher. Für die menschliche Informationsabgabe definieren Schlick et al. (2010) manuelle, verbale, auf Gesten oder Bewegung basierende Systeme, die auch als agierende Modalitäten bezeichnet werden. Bei den MMS, die heute im Einsatz sind, herrscht hauptsächlich die unimodale, unidirektionale Interaktion vor. Eine meist visuelle Schnittstelle stellt Informationen bereit und erhält über ein haptisches Bedienmodul (z.B. Tastatur) die Befehle des Menschen. Auditive Signale werden aufgrund der lauten Umgebung primär in Form von Warnsignalen verwendet. Ein kollaborativer Arbeitsraum in der Montage, bei dem Mensch und Roboter zusammenarbeiten, erfordert hingegen eine möglichst intuitive, bidirektionale Schnittstelle. Ansätze solcher natürlicher MMS können bereits im Bereich der PeSR gefunden werden. Preim und Dachsel (2015) bezeichnen eine natürliche Benutzerschnittstelle als ein System, mit dem der Nutzer intuitiv interagiert, indem er Handlungen zur Bedienung ausführt, die er auch in seiner natürlichen Umgebung nutzt. Im Folgenden werden die Grundlagen zweier solcher Systeme, Sprach- und Gestensteuerung, erläutert. Ein kurzer Abriss über sonstige Schnittstellenkonzepte schließt den Abschnitt ab.

## Sprachsteuerung

Die Sprache stellt nach Lohse (2007) die wichtigste Kommunikationsform des täglichen Lebens dar. Diese als Steuerung zu nutzen, wurde von Bolt bereits 1980 zusammen mit der Gestensteuerung untersucht. In der Forschung lassen sich nach Jurafsky und Martin (2000) zwei Vorgehensweisen unterscheiden. Zum einen die Analyse auf Basis der formalen Sprache und zum anderen die auf statistischen Modellen basierende. Der Ansatz der formalen Sprache, 1956 von Chomsky definiert und 1959/60 von Backus und Naur entwickelt, nutzt eine bestimmte Anzahl von Worten bzw. Wortfolgen, die mathematisch beschreibbar sind und dadurch analysiert werden können. Die statistischen Modelle, die seit den 90er Jahren durch *natural language processing* (NLP) den Standard darstellen, wurden basierend auf dem *Hidden-Markov-Model* (HMM) und der *noisy channel*-Metapher entwickelt. Letztere ist in Abbildung Abb. 2.10 dargestellt und skizziert schematisch die Problematik bei der Spracherkennung durch Störeinflüsse der Umwelt. Der Vorteil des statistischen Ansatzes ist, dass er die Erkennung von beliebigen Eingaben ohne feste Satzstruktur ermöglicht und damit eine natürliche Interaktion erlaubt. Da eine technisch detaillierte Erklärung der Funktionsweise der Spracherkennung und -verarbeitung zu weit führen würde, werden im Folgenden die Kernprozesse der Sprachsteuerungsstruktur zusammengefasst. Eine grundlegende Einführung in die Technologie und die verschiedenen Modelle geben Furui (2010), Jurafsky und Martin (2000) sowie Olive, Christianson und McCary (2011).

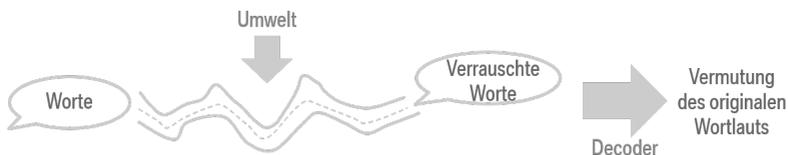


Abb. 2.10: Schematische Skizze des noisy channel nach Jurafsky & Martin (2000).

Die Funktionsweise der Sprachsteuerung, wie sie u.a. in dieser Arbeit verwendet wird, lässt sich in drei Schritte einteilen. Im ersten Schritt wird die gesprochene Sprache über eine Spracherkennungssoftware (ausgehend von der Tondatei) in eine Textdatei umgewandelt. Diese sog. *Speech-to-Text* Umwandlung ist Kern eines Spracherkennungssystems. Im zweiten Schritt wird die Textdatei über eine Software zur Absichtserkennung (engl. *intent recognition*) analysiert und die Intention des Gesprochenen an das Steuersystem zurückgegeben. Im letzten Schritt wird diese Intention in einen Aktionsbefehl umgewandelt (Microsoft, 2017). Kommerziell zur Verfügung stehende Software im Bereich der Spracherkennung lässt sich in cloud-basierte, lokale und hybride Systeme einteilen. Lokale Systeme haben den Vorteil, dass sie in der Regel schneller sind und keine Datenschutzprobleme hervorrufen. Beispiele sind die Software *Dragon Naturally Speaking* der Firma Nuance Communications (Nuance, 2017) und *Voice Pro* der Firma Linguattec (Linguattec, 2017). Der Vorteil von cloud-basierten Varianten ist der große Datensatz, der von vielen Nutzern gleichzeitig trainiert und verwendet werden kann sowie die Möglichkeit auf individuelle Faktoren (z.B. Umgebung) einzugehen. Beispiele hierfür sind die *Speech Interpretation and Recognition Software* (Siri) von Apple oder die Software *Cortana* von Microsoft (Microsoft Cortana, 2017). Hybride Systeme verbinden die Vorteile beider Varianten mit möglichst schneller Analyse und der Berücksichtigung von individuellen Faktoren oder der Analyse komplexer Satzstrukturen. Ein Beispiel hierfür ist die Software *Nuance Drive*, die in Automobilen der BMW AG eingesetzt wird (Fuest, 2012). Wie bei der serverbasierten Variante ist hierbei eine Internetverbindung die Voraussetzung.

### **Gestensteuerung**

Neben der Sprache stellt die Gestik eines Menschen eine zentrale Rolle in der natürlichen Interaktion dar. Beide Kommunikationskanäle sind eng miteinander verbunden, wobei Gestik oftmals dazu dient, das Gesagte zu unterstreichen (Kendon, 2004). Der Begriff Gestik umfasst alle Bewegungen

und Ausdrücke, die der Mensch insbesondere mit Kopf, Armen und Händen darstellen kann (Murthy & Jadon, 2009). Für die MRI im industriellen Umfeld der Montage sind insbesondere Handgesten von Bedeutung. Diese sind durch ihre eindeutigen Zeichen gut zur Prozesssteuerung geeignet und in Bezug auf den Datenschutz weniger problematisch als die Erkennung von Mimik oder Armbewegungen. Zur Interpretation von Handgesten werden hauptsächlich zwei Methoden verwendet, das bildbasierte Verfahren und die Benutzung von Datenhandschuhen, sog. *Data Gloves* (Murthy & Jadon, 2009). Da die kamerabasierte Gestenerkennung aufgrund der Rechenkapazitäten sowie der zur Verfügung stehenden Auflösung erst ab den 80er Jahren verlässlich einsetzbar ist, wurden die ersten Schritte über die Entwicklung der aktiven Data Gloves realisiert (Premaratne, 2014). Die heutige Forschung fokussiert sich auf die bildbasierte Handgestenerkennung, da diese keine zusätzlichen Hilfsmittel benötigt und eine natürlichere Interaktion ermöglicht (Suarez & Murphy, 2012). Um Handgesten über ein bildbasiertes System zu erkennen, müssen diese zuerst lokalisiert und vom Hintergrund segmentiert werden. Die drei Schritte Handsegmentierung, Extraktion der Merkmale und Klassifikation, die nach Khan und Ibraheem (2012) sowie Premaratne (2014) zur Erkennung einer Geste verwendet werden, stellt Abbildung Abb. 2.11 schematisch dar.



Abb. 2.11: Stufen der Handgestenerkennung (Premaratne, 2014).

Im ersten Schritt wird die Hand im erfassten Bild von der Umgebung segmentiert. Dabei ist zu unterscheiden, ob eine dynamische oder eine statische Geste erfasst wird. Bei statischen Gesten reicht die Segmentierung aus, dynamische erfordern zusätzlich eine Verfolgung der Hand (Khan & Ibraheem, 2012). Nach der Segmentierung folgt der Schritt der Merkmal-

sextraktion. Um die Merkmale der Geste herauszufiltern werden die drei Herangehensweisen, der *Modell-* und *Erscheinungsbasierte Ansatz* sowie die *Hand-Umriss-Analyse* angewandt (Murthy & Jadon, 2009). Der erscheinungsbasierte Ansatz beschreibt die Hand mittels Bild-Merkmalen, die sich vor allem bei Echtzeitanwendungen eignen. Der Modellbasierte Ansatz hingegen verwendet die Position der Handflächen sowie die Gelenkausrichtung der Finger im Bild, um diese über ein aufwendiges Anpassungsverfahren mit einem dreidimensionalen Modell einer Hand zu vergleichen (Murthy & Jadon, 2009). Die Hand-Umriss-Analyse basiert auf High- und Low-Level-Merkmalen, die aus dem Bild extrahiert werden (Bilal, Akmeliawati, Salami & Shafie, 2011). Fingerspitzen und Knöchel (High-Level-Merkmale) sind aussagekräftig, in ihrer Extraktion, aber schwieriger zu detektieren als die Konturen der Hand (Low-Level-Merkmale).

Die ermittelten Merkmale werden im letzten Schritt, der sog. Klassifikation zur Erkennung der Geste, analysiert. Diese ist abhängig von der Güte der Merkmalsextraktion und dem passenden Klassifikationsalgorithmus (Khan & Ibraheem, 2012). Murthy und Jadon (2009) definieren zwei Herangehensweisen. Der regelbasierte Ansatz ordnet die gefilterten Merkmale selbst festgelegten Kriterien zu und bestimmt mit diesen die Geste. Die Problematik dieses Ansatzes besteht in der Abhängigkeit der vom Mensch definierten Kriterien (Murthy & Jadon, 2009). Der weiter verbreitete Ansatz des maschinellen Lernens, basiert auf statistischen Modellen zur Interpretation der Geste. Hierzu dienen wie bei der Spracherkennung HMMs. Für detailliertere Informationen zu den grundlegenden Technologien können Murthy und Jadon (2009), Premaratne (2014) sowie Mitra und Acharya (2007) herangezogen werden. In lichtschwacher Umgebung oder einer Häufung von hautfarbenen Objekten kann die bildbasierte Gestenerkennung über analoge bzw. digitale Kamerasysteme an ihre Grenzen stoßen. Eine Alternative bilden Tiefenbildkamarasysteme, die auf Streifenprojektion, Laufzeitverfahren oder Stereo-Vision-Technologie basieren und bei Suarez und Murphy (2012) eingehend beschrieben werden. Kommerzielle Tiefen-

kameras können seit der Einführung der Microsoft *Kinect* vergleichsweise kostengünstig erworben werden. Die in der Literatur vorwiegend genutzte Tiefenkamera ist die Microsoft *Kinect*, die wie die *Asus Xtion Pro*, auf der Streifenprojektion basiert (Suarez & Murphy, 2012). Im Nachfolgemodell *Kinect V2* wird die Laufzeitmessung verwendet (Microsoft Kinect 2, 2017). Stereokamerasysteme nutzt der Sensor *LeapMotion*, der speziell für die Handgestenerkennung entwickelt wurde (LeapMotion, 2017).

### **Sonstige Steuerungskonzepte**

Neben Gesten- und Sprachsteuerung werden in der Forschung noch weitere Interaktionskonzepte untersucht. Der industrielle Einsatz dieser Konzepte ist heute jedoch aus Gründen des Datenschutzes meist nicht möglich. Beispielsweise untersucht Blume (2014) die Interaktion über Blick, Mimik und berührungempfindliche Flächen. Eine Kamera, die in der Produktion auf den Menschen gerichtet ist, ist auch mit dessen Zustimmung schwer realisierbar. Andere Ansätze und Technologien, wie die Steuerung mittels Gehirn-Computer-Schnittstelle, die bei Stankevich und Sonkin (2016) beschrieben wird, befinden sich in einem Reifegrad, der einen robusten Einsatz nicht ermöglicht. Bei derartigen Schnittstellenkonzepten ist insbesondere die Akzeptanz durch den Nutzer zu prüfen.

### 2.3 Stand der Forschung

Die MRI bietet ein breites und interdisziplinäres Feld, das viele forschungsrelevante Bereiche aufweist. Aufgrund der Menge an thematisch divergenten Publikationen, die im Rahmen der MRI veröffentlicht werden, beschränkt sich dieser Abschnitt auf Forschungsarbeiten, die im Kontext zu der vorliegenden Arbeit stehen. Dieser bezieht sich auf Studien, die die MRI zum einen vor dem Hintergrund des Produktionsumfelds betrachten und zum anderen die Wechselwirkung von Mensch und Roboter thematisieren. Letzteres wird nach Deuse, Weisner, Hengstebeck und Busch (2015) insbesondere in einem *Cyber-Physisches Produktionssystem* (CPPS) als zentrales Element angesehen. Im Folgenden wird detailliert auf relevante Forschungsarbeiten eingegangen, anhand derer der Stand der Forschung erläutert wird und Handlungsfelder aufgezeigt werden.

Wie im gesamten Forschungsfeld der MRI, gibt es in der produktionsnahen Forschung unterschiedliche Herangehensweisen. Die Hersteller von Leichtbaurobotersystemen fokussieren sich auf die Vernetzung von Robotersystemen, Ansätze zur intuitiveren Programmierung (ARENA2036, 2017; SMErobotics, 2016) sowie auf die von Bix (2016) geforderte Arbeitsraumerweiterung für Robotersysteme, um den Applikationsbereich der Roboter zu erweitern. Beispiele hierfür sind Linearachsen für den kollaborativen Betrieb oder die autonome mobile Roboterplattform *KMR iiwa* der KUKA AG (KUKA KMR iiwa, 2017). Ein Ansatz zur intuitiven Programmierung und Vernetzung zeigt die Firma Franka Emika GmbH mit dem Gesamtkonzept des Roboters *Franka*. Dieser ist mit einer intuitiven Schnittstelle und der Möglichkeit der Vernetzung per Cloud ausgestattet (Franka, 2017). Die universitäre Forschung widmet sich anwendungsbezogenen Themen. Spillner (2014) und Shen (2015) verfolgen in ihrer Betrachtung der MRI prozessbezogene Ansätze. Shen (2015) untersucht die Flexibilitätssteigerung von Fließmontagesystemen durch den Einsatz der

Mensch-Roboter-Koexistenz. Ein dazu entwickeltes Systemkonzept wird am Beispiel einer Anwendung aus der Sitzmontage getestet und zeigt, dass neben Kosten- auch Flexibilitätsvorteile realisierbar sind. Spillner (2014) entwirft vor dem Hintergrund des demographischen Wandels eine Methodik zum Erhalt von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter. Diese basiert auf dem Einsatz von MRI-Applikationen und stellt dar, wie Mensch und Organisation profitieren können. Die Arbeiten von Bortot (2014), Blume (2014) und Thiernemann (2004) legen den Fokus auf die Gestaltung des Mensch-Roboter-Systems. Bortot (2014) thematisiert bei seinen Untersuchungen ergonomische Herausforderungen, die ein geteilter Arbeitsraum in der Mensch-Roboter-Koexistenz mit sich bringt. Über empirische Untersuchungen trifft er Aussagen zu menschlichem Verhalten und zu dessen Wohlbefinden in der Nähe des Roboters sowie zur Vorhersagbarkeit des Roboterhaltens. Aus den Daten resultieren Gestaltungsempfehlungen für ein ergonomisches, koexistentes Szenario. Thiernemann (2004) geht einen Schritt näher an die Anwendung und analysiert die Anforderungen an eine MRI für den Einsatz in der Kleinteilmontage. Ausgehend von der Ermittlung wichtiger Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung und Akzeptanz des Menschen werden die Bewegungsgrößen eines SCARA-Roboters sowie deren theoretischer Einfluss ermittelt. Die erhobenen Daten sowie die entwickelten technischen Systeme werden in einer Pilotanlage in der Kleinteilmontage getestet und verifiziert. Blume (2014) legt den Schwerpunkt im Gegensatz zu Bortot (2014) und Thiernemann (2004) auf die direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter über Blicke bzw. Mimik sowie Gesten. Die durchgeführten Nutzerstudien im sozialen wie industriellen Umfeld zeigen eine positive Einstellung gegenüber der Interaktion mit dem Roboter und heben das Potential von intuitiven Schnittstellenkonzepten bei der Zusammenarbeit hervor.

Die direkte Interaktion mittels innovativer Schnittstellen, wie sie Blume (2014) thematisiert, wird in den Studien EFFIROB und LoCoBot mit Bezug auf die Automobilmontage aufgegriffen. Die Untersuchungen kommen

der Forderung von Naumann, Dietz und Kuss (2014) nach, die innovative Interaktionsmöglichkeiten für den Einsatz von Robotersystemen in unstrukturierten Produktionsumgebungen hinsichtlich des Informationsaustauschs als notwendig erachten. Neben den oben genannten, befassen sich noch weitere öffentlich geförderte Projekte mit der Wechselwirkung von Mensch und Roboter, die in Tabelle 2.1 aufgelistet sind. Die EFFIROB Studie, die im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch die Fraunhofer Institute IPA und ISI durchgeführt wurden, befasst sich mit der wirtschaftlichen und technischen Analyse elf unterschiedlicher Anwendungen für mobile Serviceroboter (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011).

Ein Anwendungsfall ist die Produktionsassistenz durch einen mobilen Roboter in der Automobilmontage. Neben den Themen Sicherheit und Lokalisierung kommt in der Analyse der Bedarf nach neuen Kommunikationsmethoden zur Steuerung des Roboters auf. Des Weiteren wird die Mensch-Maschine-Interaktion im Rahmen des Gesamtfazits als Schlüsseltechnologie aufgeführt, insbesondere Sprach- als auch Gestensteuerung werden hervorgehoben (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011). Dem Forschungsprojekt LoCoBot liegt mit der Entwicklung einer mobilen Roboterplattform zur Unterstützung des Menschen in der Automobilmontage der gleiche Anwendungsfall zu Grunde (LoCoBot, 2017). Innerhalb des Projekts werden unter anderem Untersuchungen zur Einsatzfähigkeit einer Sprachsteuerung in einer Montageumgebung durchgeführt. Deren Funktionalität wird auf eine Distanz von drei Metern eingegrenzt (Barattini, Morand & Robertson, 2012). Dadurch dass größere Entfernungen auftreten, werden Körpergesten zur Steuerung genutzt, deren Erfassung den Einsatz von Kameras erfordert (vgl. Gestenset nach Barattini, Morand & Robertson, 2012).

Anhand der analysierten Studien lässt sich ableiten, dass die Grundlagen für die technische Umsetzung der MRI mittels kommerziell verfügbarer Roboter sowie entsprechender Sensorik gegeben ist. Die Zusammenarbeit zwischen Roboter und Mensch wird bei Berücksichtigung der Sicherheit sowie der menschlichen Bedürfnisse positiv bewertet und deren Relevanz im

Tab. 2.1: Öffentlich geförderte Projekte mit Fokus auf die Mensch-Roboter-Interaktion in der industriellen Anwendung

<b>Projekt</b>	<b>Inhaltlicher Schwerpunkt</b>
<b>AMIKA</b>	<i>Adaptive Mensch-Maschine-Schnittstellen für komplexe Automationssysteme:</i> Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines kognitiven Interaktionssystems zur Vereinfachung der Nutzung und Programmierung komplexer, industrieller Robotersysteme. Dies geschieht unter Berücksichtigung von nutzerspezifisierten Voraussetzungen und Integration zusätzlicher Sensorik (AMIKA, 2017).
<b>EFFIROB</b>	<i>Effiziente innovative Servicerobotik:</i> Analysen zu Wirtschaftlichkeit und technischer Machbarkeit neuartiger mobiler Servicerobotik-Anwendungen in unterschiedlichen Umgebungen und deren Bedeutung für die Robotik-Entwicklung (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011).
<b>EsImiP</b>	<i>Effiziente und sichere Interaktion von Mensch und intelligenten Produktionsanlagen:</i> Ziel des Projekts ist die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter in zeitlich sowie räumlich naher Distanz (Koexistenz) zu ermöglichen. Experimentelle Studien zum Verhalten des Menschen dienen als Grundlage der Entwicklung einer dafür benötigten dynamischen Steuerung des Roboters (EsImiP, 2017).
<b>LoCoBot</b>	<i>Low Cost Robot Co-Worker:</i> Entwicklung einer modularen Plug-and-Produce-Roboterplattform, einer adaptierbaren Steuerung für Plug-and-Produce-Komponenten und von intelligenten Sensor sowie Aktorstrukturen (LoCoBot, 2017).
<b>PRACE</b>	<i>The Productive Robot Apprentice:</i> Fokus ist die schnelle und ökonomische Automatisierung von manuellen Arbeitsplätzen in der Fertigung. Diese beruht darauf, dass der Mensch dem Roboter durch Demonstration anlernt und diesen anschließend überwacht (PRACE, 2017).
<b>SMErobotics</b>	<i>Small and Medium Enterprise Robotics im Rahmen der European Robotics Initiative for Stengthening the Competiveness of SMEs in Manufacturing by integrating aspects of cognitive systems:</i> Ziel ist der wirtschaftliche Einsatz von Robotern in klein- und mittelständischen Unternehmen. Die Konzepte, die auf eine intuitivere Bedienung und Programmierung der Roboter abzielen, werden in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Roboterherstellern erarbeitet (SMErobotics, 2016).

industriellen Umfeld hervorgehoben. Der Bedarf von innovativen Schnittstellen für die Kommunikation zwischen Mensch und Roboter wird aufgezeigt (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011; Barattini, Morand & Robertson, 2012) und unterschiedliche Varianten analysiert, jedoch bleiben Implikationen für eine industrielle MRS offen. Des Weiteren wird nicht geklärt, welcher Bedarf für die Realisierung kollaborativer Applikationen besteht, der sich jedoch aus den Forderungen nach höherer Flexibilität (Matthias & Ding, 2013), dem Potential zur Verbesserung der Ergonomie, den Herausforderungen des demographischen Wandels sowie dem damit einhergehenden Fachkräftemangel ableiten lässt.

Wird die Vision aus Abbildung Abb. 1.1 herangezogen, ergeben sich zudem multiple Anwendungen in denen der Mensch mit Robotern interagieren und damit kommunizieren muss. Zu klären ist, welche Auswirkungen eine Interaktion mit entsprechender Kommunikation auf einen Arbeitsprozess und die Wechselwirkung von Mensch und Roboter hat. Bestehende Vorgehensweisen zur Prozessanalyse von Montageprozessen, wie sie in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt wurden, reichen dafür nicht aus, da in diesen weder die Tätigkeit des Roboters noch die Interaktion im Arbeitsprozess berücksichtigt wird.

Ansätze, die sich auf die Betrachtung des Interaktionsprozesses von Mensch und Roboter beziehen, finden sich in einer, von den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Prozessanalysen, unabhängigen Systematik nach Hoffman (2013; 2019) bzw. Hoffman und Breazeal (2007; 2010). In dieser werden subjektive und objektive Elemente präsentiert, mit der eine flüssige Interaktion (engl. *fluency of interaction*) zwischen Mensch und Roboter bei der Zusammenarbeit beschrieben und gemessen werden kann. Als subjektive Messgröße wird ein Fragebogen vorgestellt, der Fragen zur Wahrnehmung des Menschen bzgl. der Arbeit im Team in drei Kategorien *gemischte* und *individuelle* Größen sowie *zusätzliche Indikatoren* enthält (Hoffman, 2013; Hoffman & Breazeal, 2010). Diese sind teilweise vom *Work Alliance Index* nach Horvath und Greenberg (1989) abgeleitet. Als objektive Messgrößen

werden vier Zeiteinheiten definiert, die verschiedene Phasen im Prozess der Kollaboration beschreiben. Die *Human* bzw. *Robot Idle Time*, als Maß für die inaktiven Zeiteile, die *Concurrent Activity* für den Zeiteil in dem beide Partner aktiv sind und die *Functional Delay*, die prozessbedingte Wartezeiten beschreibt.

Messgrößen dieser Systematik werden in verschiedenen Forschungsarbeiten zur Analyse der Interaktion bei sog. *Übergabe Szenarien*, in den ein Partner dem anderen ein Objekt übergibt, oder bei Szenarien mit geteiltem Arbeitsplatz verwendet (Hoffman, 2019). Hoffman und Breazeal (2007) nutzen die Systematik, um die Interaktion in einem Szenario zu untersuchen, in dem ein Mensch Autoteile zu einem Roboter bringt, der diese dann zusammenbaut. Nikolaidis und Shah (2013), Shah, Wiken, Williams und Breazeal (2011) sowie Gombolay et al. (2017) wenden Teile der objektiven Messgrößen (*Idle Times*) zur Analyse der Leistung von Mensch-Roboter-Teams an. Unhelkar, Siu und Shah (2014) nutzen die Systematik als Grundlage, um die Kollaboration von zwei Menschen mit der von Mensch und Roboter in einem *Hol-Bring-Szenario* zu vergleichen. Sie verwenden die Interaktionszeit und die inaktive Zeit als objektive Messgrößen und untersuchen zudem die Wahrnehmung des Roboters sowie das Sicherheitsempfinden des Menschen. Ein ähnliches Ziel verfolgt die Studie von Lasota und Shah (2015), die den Effekt eines adaptiven Roboters auf die Interaktion sowie die Empfindungen des Menschen ermittelt. Weitere Studien, wie die von Cakmak et al. (2011) oder Huang et al. (2015) verwenden die Messgröße *Idle Times* und *Functional Delay* zur Analyse und Optimierung von Objektübergaben zwischen Mensch und Roboter.

Die in den verschiedenen Studien untersuchten Szenarien zeigen, dass eine flüssige Interaktion objektiv messbar ist und sich die Gestaltung der kollaborativen Zusammenarbeit auf den Prozess auswirkt. Zudem wird hervorgehoben, dass sich letztere über geeignete Maßnahmen positiv beeinflussen lässt. Somit besteht ein Ansatz zur Prozessbeschreibung einer MRI, der bisher jedoch keinen Bezug zu einer industriell genutzten Prozessanalyse be-

sitzt. Da die im industriellen Umfeld angesiedelten Arbeiten (Blume (2014), Thiemermann (2004), Shen (2015), etc.) die Prozessbeschreibung der MRI nicht einbeziehen, ergeben sich hinsichtlich der Analyse von Montageprozessen mit MRI folgende offene Fragestellungen, die in den kommenden Abschnitten aufgegriffen werden:

**1. Potential von interaktiven Prozessen in der Automobilfertigung**

Bei welcher Art von Anwendungsszenario (außerhalb der bereits bekannten mobilen Produktionsassistenten) bestehen bei einer kollaborativen Interaktion von Mensch und Roboter Potentiale hinsichtlich Ergonomie und Prozesszeit?

**2. Gestaltung der Schnittstelle**

Welche Anforderungen stellen sich an ein Steuerungssystem im industriellen Umfeld, welche Informationskanäle sind geeignet und wie sind diese technisch zu gestalten, um eine zuverlässige und nutzerfreundliche Kommunikation zu realisieren?

**3. Wechselwirkung Mensch, Roboter und Montageprozess**

Welche Auswirkung hat die direkte Interaktion auf den Ablauf des Montageprozesses und welchen Effekt haben Prozessgestaltung sowie Kommunikation?

### 2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zur industriellen Montage im Allgemeinen sowie deren Spezifika im Automobilbau erläutert. In diesem Zusammenhang werden bestehende, in der Industrie eingesetzte Verfahren für die ergonomische sowie die zeitliche Analyse von Montageprozessen vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die OWAS und die MTM-1 Methode eingegangen. Im Anschluss erfolgt, anhand der Beschreibung unterschiedlicher Interaktionsformen zwischen Mensch und Roboter sowie deren Zuordnung in Abhängigkeit bestimmter Anwendungsfelder, eine Einführung in die Mensch-Roboter-Interaktion. Dieser schließt sich eine Erläuterung der, für die Kommunikation zwischen Mensch und Roboter benötigten, Mensch-Maschine-Schnittstelle an, wobei explizit auf die technischen Grundlagen von Gesten- und Sprachsteuerung eingegangen wird. Den Abschluss des Kapitels bildet die Präsentation bestehender Forschungsarbeiten und öffentlich geförderter Projekte im Bereich der MRI. Darin wird der Forschungsbedarf erörtert und in drei Fragestellungen zu Potentialen von MRI Anwendungen im Automobilbau, Gestaltung von Schnittstellen und kollaborativen Prozessen überführt, womit die thematische Einführung schließt.

### **3 Bedarfsanalyse**

Der koexistente Einsatz von sensitiven Leichtbaurobotern im industriellen Umfeld war der erste Schritt hin zu einer partnerschaftlichen Interaktion von Mensch und Roboter. Für weiterreichende Ansätze, wie sie beispielsweise in der Personal Service Robotik bestehen, sind Auswirkungen der direkten Interaktion von Mensch und Roboter auf Mensch, Prozess und Umfeld zu klären. Auf Grundlage der im vorhergehenden Kapitel ermittelten Fragestellungen wird im ersten Abschnitt dieses Kapitels eine Potentialanalyse vorgestellt, die den diesbezüglich bestehenden Handlungsbedarf identifiziert. Dieser wird durch die zweistufige Analyse hinsichtlich des Bedarfs und der Anforderungen an den kollaborativen Einsatz eingegrenzt und konkretisiert. Letzteres erfolgt über die Ableitung allgemeingültiger Kriterien für MRI Applikationen, anhand derer eine Klassifizierung von realen sowie potentiellen Anwendungen durchgeführt wird. Auf der ersten Stufe der Potentialanalyse aufbauend werden Experten zu Potentialen sowie Anforderungen an eine industrietaugliche Schnittstelle und den interaktiven Prozess befragt. Die Ergebnisse der Befragung dienen der Präzisierung der initialen Handlungsfelder. Anhand dieser wird der konkrete Handlungsbedarf abgeleitet. Die Zusammenfassung des Handlungsbedarfs mit Bezug auf die Mensch-Roboter-Schnittstelle (MRS) sowie die Gestaltung des Montageprozesses schließen das Kapitel ab.

#### **3.1 Potentialanalyse**

Die Analyse des Stands der Forschung wirft die initiale Frage auf, ob neben der von Hägele, Blümlein und Kleine (2011) untersuchten mobilen Produktionsassistenz weitere potentielle Anwendungsfälle für interaktive Prozesse in der Automobilfertigung bestehen. Ziel der Potentialanalyse ist es, basierend auf einer generischen Klassifikation von Anwendungsfällen, die Relevanz interaktiver Prozesse aufzuzeigen. Hierfür werden zwei auf-

einander aufbauende Studien durchgeführt. In der ersten werden auf Basis bereits existierender Klassifikationsparameter Bewertungskriterien erarbeitet, anhand derer Experten bestehende Prozesse evaluieren. Die Evaluation ermöglicht eine Klassifizierung von MRI-Applikationen in der Montage und identifiziert die Spezifikationen derer, die einen Bedarf an direkter Interaktion aufweisen. Auf Basis der klassifizierten Szenarien erfolgt die zweite Studie, die den spezifischen Interaktionsbedarf sowie die Potentiale unterschiedlicher Schnittstellen ermittelt. Die Ergebnisse beider Studien werden abschließend mit Bezug zum Stand der Forschung diskutiert und dienen als Grundlage zur Ermittlung des Forschungsbedarfs.

#### **3.1.1 Klassifizierung von Anwendungsszenarien**

In der Forschung besteht nach Onnasch, Maier und Jürgensohn (2016) weder eine allgemein anerkannte Taxonomie der MRI noch eine spezifische mit Fokus auf Prozesse in der Montage. Um im Rahmen dieser Arbeit eine generische Einteilung für Anwendungsfälle in der Montage zu generieren, werden aus bestehenden Ansätzen spezifische Bewertungskriterien abgeleitet, anhand derer eine Klassifikation erarbeitet wird. Für die Definition der Bewertungskriterien wird auf Parameter der Literatur zurückgegriffen. Beispielhafte Klassifizierungen, die durch unterschiedliche Anwendungsgebiete und deren Anforderungen geprägt sind, bieten Steinfeld et al. (2006), Dautenhahn (2007) oder Young et al. (2010). Als Ansatz für die Definition der Bewertungskriterien werden die Parameter von Goodrich und Schultz (2007) sowie von Steinfeld et al. herangezogen. Diese sind in Tabelle 3.1 aufgelistet und bilden die Grundlage für eine anwendungsspezifische Klassifizierung, deren Parameter im Rahmen eines Workshops mit Roboter- und Produktionsexperten der BMW AG erarbeitet werden. Darin wird die Relevanz der initialen Parameter bewertet und diese an die Randbedingungen des industriellen Umfelds angepasst.

Tab. 3.1: *Klassifikationsparameter der Mensch-Roboter-Interaktion nach Goodrich und Schultz (2007) sowie Steinfeld et al. (2006)*

Grad der Autonomie
Umgebungsbedingungen des Einsatzorts
Art und Anzahl der interagierenden Partner
Einsatzszenario
Art des Informationsaustauschs

Die Parameter Umgebungsbedingung und Einsatzszenario werden nicht in die Bewertungskriterien übernommen, da nur Anwendungsfälle aus der Montage in einer industriellen Umgebung in Betracht gezogen werden und diese damit konstant sind. Der Parameter Grad der Autonomie wird vor dem Hintergrund des Einsatzszenarios Montage in die drei Ausprägungen *Automatisierungsgrad*, *Mobilität* und *autonome Entscheidungsfindung* aufgeteilt, deren Definition in Tabelle 3.2 aufgeführt ist. Dies dient der Abgrenzung von Anwendungsfällen, da die Kriterien die Gestaltung des Montagesystems beeinflussen und sich in unterschiedlicher Weise auf die nächste Ebene, die der Interaktion, auswirken. Die Art des Informationsaustauschs sowie Art und Anzahl an interagierenden Partnern werden von den industriellen Randbedingungen am stärksten beeinflusst. Ihre Ausprägung wird auf die Kriterien *Informationsaustausch* und *Interaktionsbedarf* (Definition siehe Tabelle 3.2) angepasst.

Die theoretische Definition der Bewertungskriterien stellt die Grundlage für eine qualitative Befragung von Experten dar. Zielsetzung der Befragung ist die Klassifizierung von MRI-Applikationen in der Montage und damit die Spezifizierung von Randbedingungen der Anwendungsfälle mit einem Bedarf an direkter Interaktion. Die Vorgehensweise der Befragung und deren Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Tab. 3.2: *Kriterien und deren Definition zur Klassifizierung von Anwendungsfällen der Mensch-Roboter-Interaktion*

<b>Kriterium</b>	<b>Definition</b>
<i>Automatisierungsgrad</i>	Der Automatisierungsgrad bezeichnet den prozentualen Anteil der automatisierten Prozessschritte am Gesamtprozess.
<i>Mobilität</i>	Die Mobilität bezeichnet die Anzahl an Freiheitsgraden, der dem gesamten Robotersystem (unabhängig der Anzahl an Achsen) zur Bewegung im Raum zur Verfügung steht.
<i>Autonome Entscheidungsfindung</i>	Die autonome Entscheidungsfindung bezeichnet den prozentualen Anteil an Entscheidungen, den das System während des Prozessablaufs selbst, ohne das Einwirken von außen, entscheiden kann.
<i>Informationsaustausch</i>	Der Informationsaustausch bezeichnet den Anteil der Prozessschritte in den Mensch oder Roboter verbal und/oder non-verbal kommunizieren, um ihre Handlungen abzustimmen oder den allgemeinen Status über den Prozessverlauf mitzuteilen.
<i>Interaktionsbedarf</i>	Der Interaktionsbedarf bezeichnet den Anteil der Prozessschritte (Handlungen) am Gesamtprozess, die Mensch und Roboter aufeinander abgestimmt ausführen.

### 3.1.1.1 Methodik

Im folgenden Abschnitt werden Bewertungsverfahren, Art der Anwendungsfälle, das Vorgehen zur Auswertung der Daten sowie der Umfang der Stichprobe zur Erstellung der Klassifizierung dargelegt.

#### **Bewertungsverfahren**

Im Rahmen der theoretischen Vorüberlegungen zur Klassifikation von Anwendungsfällen werden fünf Bewertungskriterien für die Befragung definiert (vgl. Tabelle 3.2). Für jedes Kriterium wird eine Bewertungslogik erstellt, anhand derer die Anwendungsfälle auf einer Skala von 0-100 evaluiert werden. Je nach Kriterium variieren die Bewertungsintervalle, die im Anhang

in Tabelle A.3 inklusive einer Erläuterung zu den Extremwerten vollständig einzusehen ist. Anhand dieses Bewertungskatalogs evaluieren acht Experten aus Produktionsplanung, Instandhaltung, Produktionsbetrieb und Arbeitssicherheit 15 verschiedene Anwendungsfälle, die (bestehende und potentielle) koexistente sowie kollaborative Applikationen umfassen. Alle Teilnehmer haben in ihrem Bereich eine Arbeitserfahrung von mindestens fünf Jahren und sind mit dem Einsatz von Robotern in der Fahrzeugmontage vertraut. Sie erhalten vor der Befragung eine Erläuterung des Bewertungsverfahrens und haben die Möglichkeit Fragen zu stellen. Im Anschluss werden die Anwendungsfälle, die im Anhang in Tabelle A.4 aufgeführt sind, über Bildmaterial oder Videos vorgestellt und direkt nach der Präsentation bewertet.

### **Verfahren zur Datenauswertung**

Um eine allgemeine Klassifikation von Robotik-Anwendungsfällen in der Montage zu generieren, wird die Bewertung der Experten über eine Clusteranalyse ausgewertet. Dies dient der Objektivierung der Ergebnisse, die auf einem subjektiven Datensatz in metrischer Form beruhen. Die Erstellung der Klassifizierung erfolgt in zwei Schritten: Im ersten wird die Anzahl der Cluster bestimmt und im zweiten werden diese gebildet. Zur Bestimmung der Clusteranzahl wird das *Average-Linkage-Verfahren* innerhalb der agglomerativen, hierarchischen Verfahren verwendet. Verfahren dieser Gruppe basieren auf der kleinstmöglichen Partitionierung, bei der zu Beginn jedes Objekt (hier: Bewertungspunkt aus der Befragung) ein Cluster repräsentiert (Backhaus, Erichson, Plinke & Wiber, 2016). Die Ähnlichkeit zwischen den Objekten entscheidet, welche miteinander verbunden werden, bis abschließend ein einziges Cluster erreicht ist. Als Proximitätsmaß zwischen den Objekten wird aufgrund der metrischen Daten die euklidische Distanz verwendet. Zur Bildung der Cluster wird das partitionierende Verfahren nach dem *K-Means-Algorithmus* durchgeführt. Der Vorteil dieses Verfahrens (bei bekannter Clusteranzahl) ist, dass die Objekte bei der Verschiebung von Clusterzentren ihre Zugehörigkeit wechseln können. Dies ist bei hierarchi-

schen Verfahren nicht möglich (Backhaus, Erichson, Plinke & Wiber, 2016). Nach Kaufman und Rousseeuw (2005) ermöglicht die Verschiebung eine bessere Lösung, weshalb das Verfahren zur Bestimmung angewandt wird.

### **Stichprobe**

An der Befragung nimmt eine Gruppe von N=8 Experten teil, die sich aus Mitarbeitern der BMW Group aus den Bereichen Produktionsplanung, Instandhaltung und Produktionsbetrieb (N=5), Arbeitssicherheit (N=1) und Technologieentwicklung bzw. Robotik (N=2) zusammensetzt. Bei keinem der Teilnehmer treten während der Datenerfassung Fehler auf, womit alle Datensätze ausgewertet werden.

#### **3.1.1.2 Ergebnis und Diskussion**

Die Auswertung der Daten anhand des Average-Linkage-Verfahrens ergibt eine Anzahl von drei Clustern. Diese Anzahl kann über die Analyse der Silhouette (Angabe der Güte der Zuordnung) mit Erreichen des höchsten durchschnittlichen  $s_i$ -Werts von 0.31 bestätigt werden. Das auf dem K-Means-Algorithmus basierende Ergebnis der Analyse der Clusterzugehörigkeit zeigt Tabelle 3.3.

Tab. 3.3: Mittelwerte der Gruppen nach der Bestimmung über das K-Means-Verfahren [%]

	Cluster		
	I	II	III
Automatisierungsgrad	94.29	54.20	89.76
Interaktionsbedarf	18.57	56.36	9.27
Mobilität	92.86	21.02	7.20
Informationsaustausch	38.71	52.61	17.07
Autonome Entscheidungsfindung	52.29	19.32	14.02

In den drei identifizierten Clustern, im folgenden Szenarien genannt, weisen die Kriterien Interaktionsbedarf und Informationsaustausch übergreifend ähnliche Werte auf. Das *Mischszenario* (Cluster I) und das *koexistente Szenario* (Cluster III) zeigen einen geringen bis wenig vorhandenen Interaktionsbedarf, der Wert des Kriteriums Informationsaustausch liegt leicht darüber (vgl. Tabelle 3.3). Im *Interaktionsszenario* (Cluster II) sind beide Werte vergleichsweise hoch. Aus den Daten geht hervor, dass über die Einteilung zu Mischszenario hohe Mobilität und ein hohes Maß an autonomer Entscheidungsfindung in Kombination mit einem hohen Automatisierungsgrad entscheidet. Dem gegenüber steht das koexistente Szenario, für das geringe Werte bei Mobilität und autonomer Entscheidungsfindung sowie ein hoher Automatisierungsgrad entscheidend sind. Im *Interaktionsszenario* bestimmen der Interaktionsbedarf und der Informationsaustausch über die Zuteilung. Für die Veranschaulichung der Ergebnisse werden die Szenarien in Abbildung Abb. 3.1 visualisiert. Diese dienen als Beispiel für Applikationen, die dieser Art entsprechen. Das Mischszenario bildet beispielsweise einen autonom agierenden mobilen Roboter in der Montage ab. Das Interaktionsszenario repräsentiert Anwendungen mit erhöhtem Interaktionsbedarf und Informationsaustausch, mittlerer Mobilität sowie geringer autonomer Entscheidungsfindung. Das koexistente Szenario, basiert auf stationären Anwendungen, deren Prozess hochautomatisiert und ohne nennenswerte menschliche Beteiligung abläuft. Anhand der Klassifizierung lassen sich Anwendungen entsprechend ihrer Eigenschaften einordnen und hinsichtlich ihres Potentials für eine direkte Interaktion bewerten. Die Identifikation des *Interaktionsszenarios* zeigt beispielhaft die Randbedingungen von Applikationen mit der Ausprägung für direkte Interaktion in der Montage auf und bildet damit die Grundlage für die Definition von Prozessspezifikationen und Anforderungen.

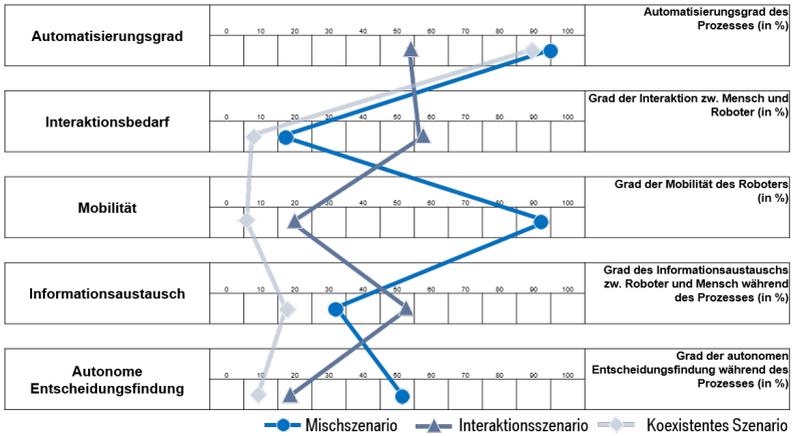


Abb. 3.1: Identifizierte Szenarien für MRI-Applikationen.

### 3.1.2 Fragebogen

Die Klassifikation ermöglicht es, die Eignung von Applikationen für den kollaborativen Betrieb einzugrenzen. Um die Fragestellung nach dem Potential von interaktiven Prozessen vollständig zu erfassen, ist es erforderlich, die identifizierten Szenarien in Bezug auf das gesamte Produktionssystem zu verorten und anwendungsspezifische sowie allgemeine Anforderungen zu definieren. Zudem sind die Potentiale unterschiedlicher MRS (vgl. Kap. 3.1) zu klären, da diese bei steigendem Interaktionsbedarf für die Kommunikation elementar sind. Der zweite Schritt der Potentialanalyse basiert auf einem qualitativen Fragebogen. Für dessen Beantwortung werden Experten aus den Bereichen Robotik, Steuerungstechnik, Instandhaltung und Montageplanung unterschiedlicher Werke sowie Experten aus Vorentwicklung und Arbeitssicherheit befragt. Es wird ein selbst erstellter Fragebogen herangezogen, der sich in drei Abschnitte gliedert. Der erste Teil enthält drei Fragekategorien, die vor dem Hintergrund der industriellen Fertigung zu bewerten sind: Die Gestaltung einer MRS, die Interaktion und die Potentiale der MRI. Letztere

unterteilt die Bewertung in koexistente und kollaborative Anwendungen. Die Kategorien dienen neben der Potentialanalyse der Erfassung von Gestaltungsempfehlungen an das Gesamtsystem einer MRI (vgl. Kap. 2). Die darin enthaltenen Fragestellungen basieren auf dem derzeitigen Stand der Wissenschaft und beziehen sich auf Zühlke (2012), Schlick, Bruder und Luczak (2010), Blume (2014), Stankevich und Sonkin (2016), Reinhard und Rösel (2010), Arai et al. (2010), Fischer et al. (2014) sowie Joosse et al. (2013). Der zweite Teil dient der Analyse, der über die Clusteranalyse hervorgegangenen, MRI-Szenarien. Aufbauend auf den drei Szenarien werden Frageblöcke zu allgemeiner Relevanz, Einordnung in das Produktionssystem des Automobilbaus und zu Gestaltung sowie Bedarf einer Schnittstelle gestellt. Letzteres soll den spezifischen Bedarf an Interaktion über eine MRS klarstellen. Mit einer offenen, übergreifenden Fragestellung zu Herausforderungen und Potentialen von MRI-Anwendungen schließt der dritte Teil den Fragebogen ab. Die Bewertung der einzelnen Frageblöcke erfolgt anhand einer fünfstufigen Likert-Skala, die über *sehr gut* bis *schlecht*, *sehr hoch* bis *sehr gering* oder *trifft voll zu* bis *trifft nicht zu* an die jeweilige Fragestellung angepasst ist. An der Befragung nehmen N=14 Experten teil, die im Mittel eine Berufserfahrung von 4.8 Jahren besitzen. Der vollständige Fragebogen befindet sich im Anhang (siehe Abb. A.4).

### 3.1.3 Ergebnisse

Der folgende Abschnitt präsentiert die Ergebnisse der Expertenbefragung, untergliedert in die drei thematischen Bereiche des Fragebogens. Im Anschluss werden diese unter Einbeziehung der Gesamtheit der Daten sowie den Erkenntnissen bisheriger Studien diskutiert.

### Teil I - Gestaltung von MRI-Prozessen in der Produktion

Die Bewertung der Potentiale menschlicher Modalitäten zur Kommunikation mit einem Roboter in der industriellen Produktion zeigt, dass das visuelle Wahrnehmungssystem als das geeignetste betrachtet wird. Die auditive und taktile Modalität liegen in der Bewertung gleich auf und befinden sich im Bereich zwischen *hohem* und *mäßigem* Potential. Vestibuläre und olfaktorische Wahrnehmungssysteme sind der Vollständigkeit halber aufgeführt. Sie werden als ungeeignet erachtet (vgl. Abb. 3.2).

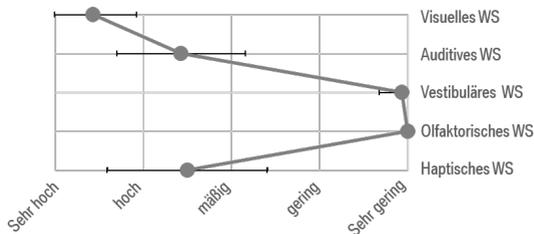


Abb. 3.2: Bewertung des Potentials menschlicher Wahrnehmungssysteme zur Interaktion mit einem Roboter in industrieller Umgebung. Angegeben ist der Mittelwert, die Fehlerbalken beziehen sich auf die zugehörige Standardabweichung.

Das Ergebnis der Potentialbewertung von MRS zur Steuerung eines Roboters in einer industriellen Umgebung zeigt Abbildung Abb. 3.3. Hieraus ist ersichtlich, dass das klassische Konzept eines Schalters oder Tasters als *sehr gut* erachtet wird und die geringste Abweichung im Vergleichsfeld aufweist. Auf dies folgt die Sprachsteuerung sowie mit jeweils geringer Differenz in der Bewertung die sensitiven Interaktionsflächen (Differenz = 0.07 Bewertungseinheiten (BE)) und die Gestensteuerung (Differenz = 0.15 BE). Alle drei Konzepte haben eine *gute* Bewertung, wobei die Streuung in der Bewertung bei den sensitiven Interaktionsflächen am geringsten ausfällt (vgl. Abb. 3.3). Die Schnittstellen, die auf Gesichtserkennung oder Gedanken basieren, liegen deutlich hinter diesen.

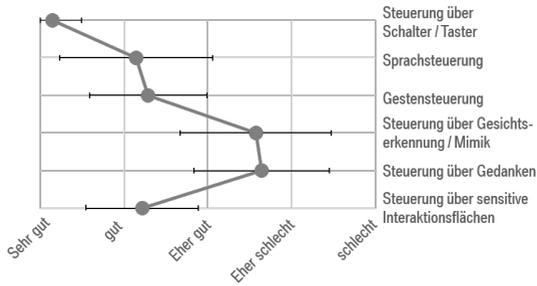


Abb. 3.3: Eignung unterschiedlicher Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Steuerung eines Roboters in einem industriellen Fertigungsprozess. Angegeben ist der Mittelwert, die Fehlerbalken beziehen sich auf die zugehörige Standardabweichung.

Die Bewertung von Einflussfaktoren auf die Akzeptanz einer Interaktion mit einem Roboter zeigt, dass nach der Meinung der Experten die *Reaktionszeit* und eine *flüssige Interaktion* von hoher Bedeutung sind (vgl. Abb. 3.4). Die Reaktionszeit markiert den wichtigsten Faktor dieser Bewertung (Differenz = 0.31 BE,  $SD_{\text{Reaktionszeit}} = 0.89$ ), die Flüssigkeit befindet sich mit einer geringen Differenz (0.14 BE) auf dem zweiten Rang und weist die geringste Streuung auf ( $SD_{\text{Flüssigkeit}} = 0.79$ ).

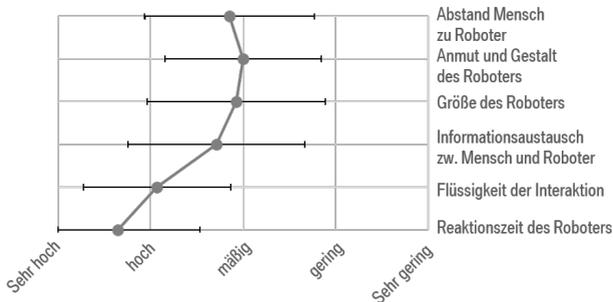


Abb. 3.4: Bewertung von Einflussfaktoren auf die Akzeptanz einer Interaktion mit einem Roboter in einem industriellen Fertigungsprozess. Angegeben ist der Mittelwert, die Fehlerbalken beziehen sich auf die zugehörige Standardabweichung.

Die Faktoren *Abstand zwischen Mensch und Roboter*, *Gestalt*, *Größe des Roboters* sowie *Informationsaustausch* liegen mit einer *mäßigen* Bewertung auf einem sekundären Niveau (vgl. Abb. 3.4). Bei der Gestaltung der Interaktion im Fertigungsprozess sehen die Experten den Menschen klar als aktiven Partner. Die gleichberechtigte Aufteilung im Prozess liegt 1.3 BE hinter dieser und zeigt die höchste Uneinigkeit in der Bewertung auf ( $SD_{Gl. Aufteilung} = 1.24$ ). In Kombination mit der Ablehnung der passiven Rolle des Menschen wird der Fokus auf den Menschen in der MRI unterstrichen. Zudem stellt sich heraus, dass die Interaktion gegenüber dem Prozessgeschehen eine nachgelagerte Rolle einnehmen soll (vgl. Abb. 3.5).

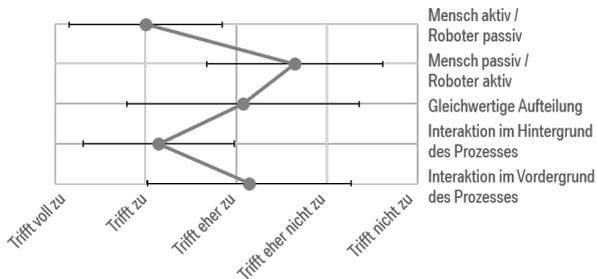


Abb. 3.5: Gestaltung der Interaktion von Mensch und Roboter in einem industriellen Fertigungsprozess. Angegeben ist der Mittelwert, die Fehlerbalken beziehen sich auf die zugehörige Standardabweichung.

Die Erwartung der Experten gegenüber MRI-Applikationen in Abhängigkeit der Betriebsform, die in Abbildung Abb. 3.6 (a) dargestellt sind, zeigen, dass der kollaborative Betrieb hinsichtlich Ergonomie und Flexibilität eine höhere Zustimmung erreicht als der koexistente. Die deutlichste Differenz besteht in der Ergonomie, die auch die eindeutigste Bewertung aufweist ( $SD_{Gl. Aufteilung} = 0.45$ ), die geringste bei Verbesserung der Qualität. Insgesamt gehen die Experten vor dem Hintergrund erfüllter Randbedingungen bei beiden Betriebsarten von einer Verbesserung der Produktionsfaktoren aus. Die Erwartungshaltung gegenüber dem koexistenten Betrieb ist insge-

samt höher als die bei der Kollaboration. Des Weiteren wird deren Anzahl an Anwendungsfällen im Vergleich zu den kollaborativen Anwendungen als höher und deren Komplexität niedriger eingeschätzt (vgl. Abb. 3.6 (b)).

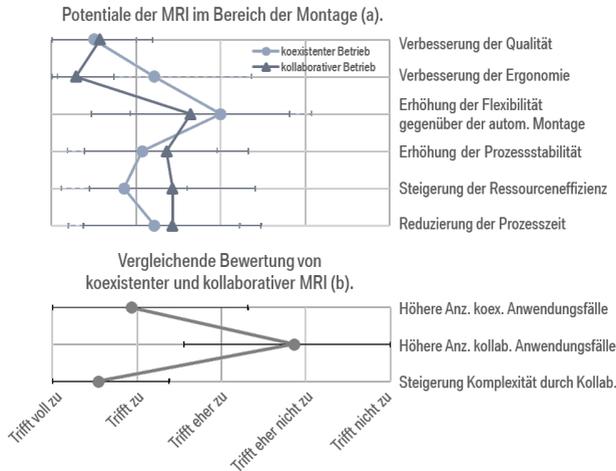


Abb. 3.6: Potentiale der Mensch-Roboter-Interaktion in der Montage in Abhängigkeit von koexistenterem und kollaborativem Betriebsmodus (a); Bewertung der Anzahl an Anwendungsfeldern und der Komplexität in Abhängigkeit des koexistenteren bzw. kollaborativen Betriebsmodus (b). Angegeben ist der Mittelwert, die Fehlerbalken beziehen sich auf die zugehörige Standardabweichung.

## Teil II - Spezifizierung der Szenarien

Das Potential der definierten Szenarien bezogen auf Produktionsbereiche in der Automobilindustrie zeigt Abbildung Abb. 3.7. Das *koexistente Szenario* stellt sich in der Bewertung als das mit den breitesten Anwendungsmöglichkeiten dar. Es liegt nur im Bereich der Logistik hinter den anderen zurück. Das *Interaktionsszenario* sticht im Bereich der Vormontage heraus und das *Mischszenario* zeigt gemäß dem hohen Grad an Mobilität das höchste Potential für Anwendungen in der Logistik. Die Bereiche mit hohem Automatisierungsgrad (Karosseriebau und Lackiererei) weisen im Vergleich zu den anderen Bereichen eine geringere Anwendungsrelevanz auf.

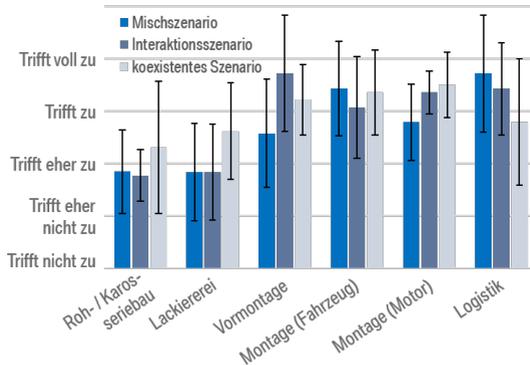


Abb. 3.7: Bewertung der Relevanz der definierten Szenarien hinsichtlich ihres Anwendungspotentials in unterschiedlichen Bereichen der Automobilproduktion. Angegeben ist der Mittelwert, die Fehlerbalken beziehen sich auf die zugehörige Standardabweichung.

Die Eignung von Schnittstellen wird in Abbildung Abb. 3.8 in Abhängigkeit der drei definierten Szenarien dargestellt. Nach Meinung der Experten sind visuelle und einfache Schnittstellenkonzepte über alle Szenarien hinweg am geeignetsten. Ein *einfaches* Schnittstellenkonzept stellt in der Befragung ein einfach zu übertragendes Signal (z.B. Warnsignal) bzw. Eingabesystem (z.B. Schalter) dar. Unter *komplexen* Konzepten werden technisch aufwendigere Signale wie zum Beispiel Sprachnachrichten oder eine Gestensteuerung zusammengefasst. Bei einfachen Systemen besteht nur eine geringe Differenz in der Bewertung. Die komplexen Systeme unterscheiden sich hingegen deutlich. Im *Interaktionsszenario* zeigt sich der Bedarf nach einer Schnittstelle am stärksten und die Differenz zwischen einfachen und komplexen Systemen ist am geringsten. Das *koexistente Szenario* weist in der Bewertung ein gegensätzliches Bild auf. Die Schnittstelle sollte möglichst in einfacher Form ausgeführt werden. Das *Mischszenario* liegt zwischen den beiden, der Bedarf einer komplexen Schnittstelle wird ebenfalls als weniger relevant bewertet, die Abwesenheit einer Schnittstelle aber klar verneint.

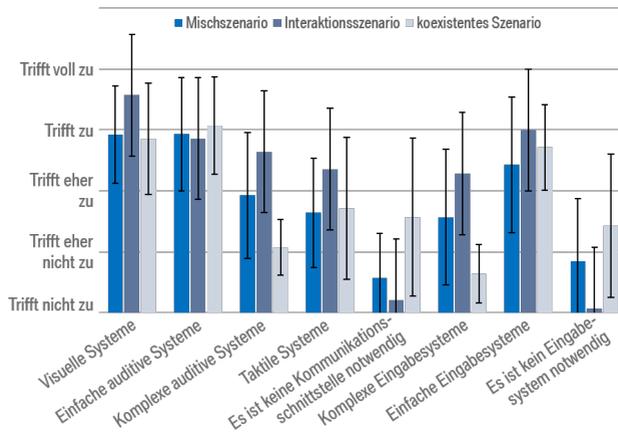


Abb. 3.8: Bewertung der Eignung von Schnittstellensystemen in Abhängigkeit der definierten Szenarien. Angegeben ist der Mittelwert, die Fehlerbalken beziehen sich auf die zugehörige Standardabweichung.

### Teil III - Herausforderungen und Potentiale der MRI

Die in Abbildung Abb. 3.9 dargestellten Ergebnisse auf die offene Frage nach Herausforderungen bei der Realisierung, führen neben den dominanten Faktoren Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und technischer Umsetzung sowohl die Gestaltung der Interaktion, als auch die Akzeptanz durch den Menschen auf. Dabei wird von den Teilnehmern betont, dass die Interaktion der beiden Partner flüssig gestaltet werden sollte, um die Akzeptanz der Werker zu erhalten. Beispielhaft wird in diesem Zusammenhang auch die Zusammenarbeit von zwei Menschen aufgeführt. Die Betrachtung der Potentiale zeigt, dass die Erwartungen bzgl. einer verbesserten Wirtschaftlichkeit und Ergonomie am deutlichsten ausgeprägt sind. Qualität und sonstige technische Kriterien ergeben zusammengenommen einen ähnlichen Wert wie die Kategorien Ergonomie und Wirtschaftlichkeit (vgl. Abbildung Abb. 3.9). Die Interaktion wird auch bei den Potentialen aufgeführt, da bei geeigneter Gestaltung eine verbesserte Wirtschaftlichkeit und Prozessflexibilität erwartet wird. In Abbildung Abb. 3.9 werden die Ergebnisse thematisch zusammengefasst

gezeigt, eine detaillierte Darstellung aller genannten Herausforderungen und Potentiale kann dem Anhang entnommen werden (Abb. A.1 und Abb. A.2).

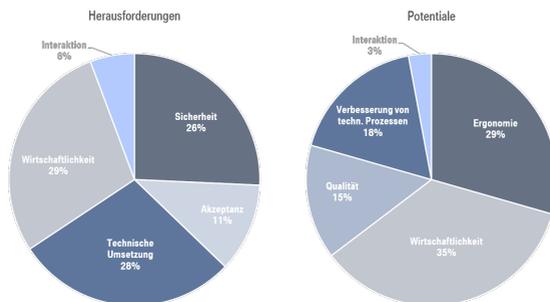


Abb. 3.9: Herausforderungen (links) und Potentiale (rechts) einer kollaborativen MRI in der Montage.

#### 3.1.4 Einordnung in den Rahmen des Forschungsbedarfs

Die Ergebnisse des ersten Teils der Befragung legen dar, dass die bisher vorherrschenden Medien zur Bereitstellung von Information in der Produktionsumgebung von den Experten auch für die MRI bevorzugt werden. Der visuellen Information, die bereits heute in den Werken überwiegt, wird, gefolgt von auditiven und haptischen Informationen, das größte Potential zugesprochen. Zudem werden einfache Konzepte bei der Bewertung von MRS, wie Knöpfe oder Schalter, komplexeren Schnittstellen vorgezogen. Der von Blume (2014) untersuchten Schnittstelle zur Kommunikation mittels Mimik wird (vor dem Hintergrund der industriellen Fertigung) deutlich weniger Potential zugesprochen als der ebenfalls evaluierten Gesten- (Blume, 2014; Barattini, Morand & Roberston, 2012) oder der Sprachsteuerung. Letztere wird, trotz der hohen Umgebungsgeräusche in der Produktion, bevorzugt, womit die Ergebnisse der Studie von Khan (1998) entsprechen. In dieser wird festgestellt, dass die Mehrheit der Probanden die Steuerung eines Roboters mittels Sprache gegenüber anderen Kommunikationsformen präferiert.

Die Bewertung der Einflussfaktoren auf die Akzeptanz hebt unter anderem die Reaktionszeit des Roboters und die flüssige Interaktion hervor. Dies wirft die Frage auf, welches Schnittstellenkonzept eine flüssige Interaktion und Kommunikation fördert und ob die von den Experten bevorzugten Informationskanäle in ihrer heutigen Form für zukünftige kollaborative Prozesse geeignet sind. Die vergleichende Betrachtung der Szenarien im zweiten Teil des Fragebogens bestätigt diese Fragestellung. In allen Szenarien werden einfache Bedien- und Kommunikationssysteme sowie visuelle und einfache auditive Informationssysteme als am geeignetsten bewertet. Zudem werden diese den komplexeren technischen Systemen bevorzugt. Es ist jedoch zu beachten, dass komplexe Systeme mit steigendem Interaktionsbedarf in der Studie besser bewertet werden (vgl. Abb. 3.8) und somit die Aussage der EFFIROB-Studie gestützt wird. Diese postuliert, dass sich die Relevanz neuartiger Schnittstellen mit der Einführung innovativer technischer Systeme mit steigendem Interaktionsbedarf erhöht (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011). Dies lässt u.a. den Schluss zu, dass komplexere Interaktionsschnittstellen aufgrund des bisher geringen Interaktionsbedarfs in der Automobilindustrie als weniger geeignet empfunden werden und die Ergebnisse der Befragung in dieser Hinsicht eventuell voreingenommen sind. Wird die Interaktion aus Produktionssicht betrachtet, ist die Effizienz dieser die Maxime und folglich ein „blindes Verständnis“ beider Partner ohne den zeitlichen Zusatzaufwand einer Abstimmung (Kommunikation) anzustreben. Aufgrund der Variantenvielfalt, die ein Produktionssystem in der Automobilindustrie bedienen muss, ist dies, ohne Kommunikation zum Menschen, bereits heute kaum zu realisieren. Demnach gilt es, die Interaktion so flüssig wie möglich zu gestalten, im Besonderen bei der Einführung komplexerer Schnittstellen. Zusammenfassend lassen sich daraus Anforderungen an die Schnittstelle ableiten, die eine intuitive Bedienung bieten und einen flüssigen Prozessablauf zwischen Werker und Roboter gewährleisten soll. Die vergleichende Evaluation der koexistenten und kollaborativen Anwendungen deckt sich mit vorhergehenden Studien (Reinhard & Rösel, 2010)

und zeigt eine Differenzierung der Betriebsmodi. Der koexistente Betrieb wird bevorzugt, da eine höhere Anzahl an Anwendungsfällen und eine geringere Komplexität bei der Umsetzung erwartet wird (vgl. Abb. 3.6). Dies deckt sich zudem mit der Verortung der Szenarien im Produktionssystem, in der das koexistente Szenario die breiteste Anwendungsmöglichkeit findet. Die Betrachtung der Herausforderungen zeigt, dass die wirtschaftliche Realisierung einer kollaborativen MRI den Schwerpunkt bildet (vgl. Abb. 3.9). Die Umsetzung eines Anlagenkonzepts ist, wie bei klassischen Roboterapplikationen, primär davon abhängig, ob die technische Machbarkeit im Rahmen der sicherheitstechnischen Anforderungen wirtschaftlich darstellbar ist (vgl. hybride Montagesysteme in Kap. 2.1). Des Weiteren werden Interaktion und Akzeptanz als Herausforderungen genannt. Die Experten heben hervor, dass der Prozess sowie die darin enthaltene Interaktion zwischen Mensch und Roboter optimal zu gestalten ist, um die Akzeptanz der Werker zu erhalten. Dies gilt insbesondere für Prozesse, in den eine mehrfache Abstimmung der beiden Partner erforderlich ist. Somit ist für den Handlungsbedarf zu beachten, dass einige der aufgeführten Herausforderungen, wie die Realisierung der Sicherheit und die wirtschaftlich, technische Umsetzung des Gesamtsystems, standardisierte sowie bekannte Anforderungen darstellen. Andere, wie die optimale Gestaltung der Interaktion in einem kollaborativen Prozess und deren Auswirkung auf die Zielgrößen der Montage, sind weitgehend unbekannt.

Die größten Potentiale werden im Bereich von Wirtschaftlichkeit und Ergonomie gesehen. Neben Vorteilen mit technischem Bezug stellt die Verbesserung der Qualität mit 15% ebenfalls einen Teilbereich dar. Dies deckt sich mit den allgemeinen Erwartungen an den Einsatz von kollaborierenden Robotern (vgl. Thiermann, 2004; Matthias & Ding, 2013), wobei das wirtschaftliche Potential bei der kollaborativen MRI nicht so stark ausgeprägt ist, wie bei koexistenten Anwendungen (vgl. Abb. 3.9). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass qualitative Faktoren wie Ergonomie und Qualität indirekt zur Wirtschaftlichkeit beitragen. Die Potentiale der

MRI liegen somit sowohl im quantitativen als auch im qualitativen Bereich. Zu letzterem zählt die Interaktion beider Partner (vgl. Abb. 3.9). Für deren objektive Messung bietet die Methode von Hoffman (2013) einen Ansatz, der jedoch nicht ausreicht, um die Auswirkung auf den industriellen Prozessablauf ganzheitlich zu beschreiben.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass übergeordnete Anforderungen wie bspw. Wirtschaftlichkeit und Sicherheit den Gestaltungsrahmen definieren, in dem sich die technische Realisierung der MRI bewegt. Die Interaktion zwischen Mensch und Roboter sowie der Bedarf einer Schnittstelle werden über die Spezifikationen des Anwendungsfalls bestimmt. Voraussetzung für einen Prozess mit direkter Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter sind ein Mindestmaß an Informationsaustausch und Interaktionsbedarf sowie ein Automatisierungsgrad, der eine angemessene Aufgabenteilung erlaubt. Montageprozesse dieser Art sind laut den Ergebnissen vor allem in der Vormontage, aber auch in der Fahrzeug- und Motormontage sowie der Logistik zu finden. Die genannten Bereiche weisen eine hohe Mitarbeiterdichte auf, die seitens des Roboters mindestens eine informative Benutzerschnittstelle erfordert. Dies gilt im Besonderen, wenn die Mobilität sowie die autonome Entscheidungsfindung des Robotersystems gesteigert werden (vgl. *Mischszenario* in Abb. 3.8). Für die Realisierung eines solchen Anwendungsfalls steht die flüssige Interaktion von Mensch und Roboter, die u.a. über eine geeignete Schnittstelle ermöglicht wird, im Zentrum eines effizienten Montageprozesses.

### 3.2 Handlungsbedarf

Die Potentialanalyse zeigt, dass in Bereichen der Automobilproduktion die Voraussetzungen für die Umsetzung von MRI Anwendungen gegeben sind und Potential für interaktive Applikationen besteht. Mit der Definition des generischen, kollaborativen *Interaktionsszenarios* kann die erste Fragestellung nach Art des Anwendungsszenarios beantwortet werden. Die Interaktion wird als zentrales Element identifiziert und zudem spezifische Anforderungen an die Informationskanäle zur Kommunikation zwischen Mensch und Roboter definiert. Die Fragestellung, welche Auswirkung die Gestaltung des kollaborativen Prozesses auf die Zielgrößen der Montage hat, bleibt ebenso zu evaluieren, wie die nach einer geeigneten Gestaltung der Benutzerschnittstelle für eine flüssige Interaktion. Somit eröffnen sich zwei Handlungsfelder: Zum einen die Integration und Evaluation einer MRS, die vor dem Hintergrund des industriellen Fertigungsprozesses eine einfache (natürliche) Kommunikation zwischen Mensch und Roboter ermöglichen soll. Und zum anderen wie die Interaktion der beiden Partner innerhalb des kollaborativen Montageprozesses gestaltet werden kann, damit für Mensch und Prozess ein optimales Ergebnis erzielt wird. Beide Handlungsfelder werden im Folgenden präzisiert.

#### **Mensch-Roboter-Schnittstelle**

Nach DIN EN ISO 9241 (2011) bieten menschenzentrierte Benutzerschnittstellen ökonomische sowie soziale Vorteile. Über eine intuitive Gestaltung kann der Prozess effektiver sowie effizienter erfolgen, was letztlich zu einer steigenden Effizienz des Arbeitssystems führt. Somit spielt die MRS eine entscheidende Rolle bei der Befähigung des interaktiven Prozesses. Die Einschätzung der Experten zeigt, dass die visuelle Modalität bei der Informationsabgabe sowie eine einfache Steuerung des Roboters (aus Sicht des Nutzers) bei allen Szenarien im Fokus stehen. Mit steigendem Interaktionsbedarf rücken technisch komplexere Steuerungskonzepte, die eine natürliche

Interaktion über Gesten oder Sprache erlauben, sowie auditive und taktile Informationsübermittlung in den Fokus (vgl. *Misch- / Interaktionsszenario* in Abb. 3.8). Vor diesem Hintergrund ist zu evaluieren, welches MRS-Konzept für einen flüssigen, interaktiven Prozessablauf im industriellen Umfeld am besten geeignet ist und ob natürliche Schnittstellenkonzepte dabei einen Vorteil vor herkömmlichen besitzen.

### **Gestaltung der Interaktion im Montageprozess**

Interaktiv gestaltete Prozesse zwischen Mensch und Roboter versprechen eine potentielle Verbesserung von Wirtschaftlichkeit und Ergonomie. Ein höherer Interaktionsbedarf geht mit einem höheren Kommunikationsbedarf einher und eröffnet die Frage, wie sich dies auf die Akzeptanz und auf den Prozessablauf des kollaborativen Systems sowie dessen Zielgrößen auswirkt. Für die objektive Beschreibung der Wirkzusammenhänge zwischen einer flüssigen Interaktion und den Prozessgrößen existiert bisher keine Systematik. Diese ist zu konzipieren, um anhand einer solchen Analyse ein für Mensch sowie Produktionssystem optimales Ergebnis abzuleiten. Dabei ist zu klären, ob und in welchem Maße sich die Gestaltung der Interaktion mit dem Roboter auf den Ablauf des Montageprozesses und dessen Kenngrößen, Ergonomie und Wirtschaftlichkeit, auswirkt.

### **3.3 Zusammenfassung**

Basierend auf der Analyse des Stands der Forschung auf dem Feld der MRI im vorhergehenden Abschnitt, präzisiert dieses Kapitel den Forschungsbedarf über eine zweistufige Potentialanalyse und überführt diesen in zwei konkrete Handlungsfelder.

Zur Identifizierung des Potentials von MRI-Applikationen wird in der ersten Analyse eine Klassifizierung von Anwendungsfällen vorgenommen, aus der drei Szenarien (ein Misch-, ein Interaktions- und ein koexistentes Szenario) hervorgehen. Diese haben einen jeweils variierenden Grad an Interaktion,

Automatisierung, Informationsaustausch, autonomer Entscheidungsfindung und Mobilität. In Abhängigkeit der drei Szenarien werden in der zweiten Stufe Experten zu allgemeinen sowie anwendungsspezifischen Potentialen von Schnittstellen, einem kollaborativen Prozess sowie zu Herausforderungen und Potentialen der MRI befragt. Die Analyse erlaubt es die drei Szenarien voneinander abzugrenzen und im Produktionssystem zu verorten, wobei das Interaktionsszenario das größte Potential für die Umsetzung einer direkten Interaktion bereitstellt. Die Fragestellungen zu den Potentialen sowie Herausforderungen von interaktiven Prozessen im Automobilbau liefern in Kombination mit denjenigen zur Gestaltung der Schnittstelle die Daten, mittels derer die Handlungsfelder präzisiert werden. Aus diesen wird ein konkreter Handlungsbedarf zu zwei Themenfeldern abgeleitet: Der Gestaltung einer MRS und der eines Interaktionsprozesses, der einen flüssigen und interaktiven Prozessablauf gewährleistet, um die Kenngrößen der industriellen Montage zu erfüllen. Die Ergebnisse der Potentialanalyse dienen als Basis für die Konzeption einer MRS sowie einer Systematik zur Analyse der Interaktion in einem Montageprozess, die im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

## **4 Schnittstellenkonzeption und Prozessinteraktionssystematik**

Die Identifikation der Anwendungsszenarien im vorhergehenden Kapitel zeigt, dass in der Automobilproduktion Potential für kollaborative Prozesse besteht. Diese gehen mit einer direkten Interaktion zwischen Mensch und Roboter einher, deren Ausgestaltung bisher wenig betrachtet wurde. Zur Bewertung dieser sind zum einen eine MRS und zum anderen die Analyse des interaktiven Prozessablaufs erforderlich. Der höhere Bedarf an Interaktion bietet Raum für natürliche Schnittstellen, die dem Bedürfnis nach mehr Flexibilität in einem menschenzentrierten Prozess entsprechen. Anhand der im vorherigen Abschnitt identifizierten Anforderungen werden im ersten Teil des Kapitels Schnittstellen konzipiert und umgesetzt. Dies umfasst die Konzeptfindung sowie die Funktionsweise von drei Modulen zur Steuerung des Roboters und vier Modulen zur Informationsübermittlung an den Menschen. Der zweite Teil des Kapitels befasst sich mit der Beschreibung von messbaren Wirkzusammenhängen innerhalb eines interaktiven Prozesses. Hierfür wird eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Systematik zur Prozessinteraktionsanalyse vorgestellt. Auf Basis dieser Systematik werden abschließend Kenngrößen für die Gestaltung eines MRI-Prozesses in der Montage hergeleitet.

### **4.1 Konzeption der Mensch-Roboter-Schnittstelle**

Die Anforderungen an eine MRS werden durch den Anwendungsfall spezifiziert und variieren von einer einseitig informativen Schnittstelle bis zur vollkommen integrierten Steuerung. Grundlage der Konzeption bildet das in Kap. 3.1 identifizierte Interaktionsszenario. In dieses fließen die Erkenntnisse der Expertenbefragung sowie der Stand der Technik mit ein. Da sich die geltenden Normen nur auf die konventionelle Produktionsumgebung beziehen, existiert bisher kein Standard zur Gestaltung von Schnittstellen

für die MRI (Barattini, Morand & Robertson, 2012). Dies erfordert in der Konzeptionsphase sowohl die Entwicklung von geeigneten Eingabemodulen zur Steuerung des Roboters als auch von Informationsmodulen, die den Menschen über den Zustand desselben informieren. Benutzerschnittstellen, die in der Produktion eingesetzt werden, nutzen nach Zühlke (2012) hauptsächlich zwei Modalitäten, um unidirektional zu kommunizieren. Das trifft auch für die Montage in der Automobilindustrie zu. Visuelle und haptische Modalitäten dominieren, die auditive wird meist nur in Form von Warnsignalen verwendet. Beispiele zu Informationsschnittstellen in Werken der Automobilindustrie zeigt Abbildung Abb. 4.1. Basierend auf den heutigen Schnittstellen werden in den folgenden Abschnitten Steuer- und Informationsmodule getrennt voneinander konzipiert und die daraus resultierenden Module vorgestellt.

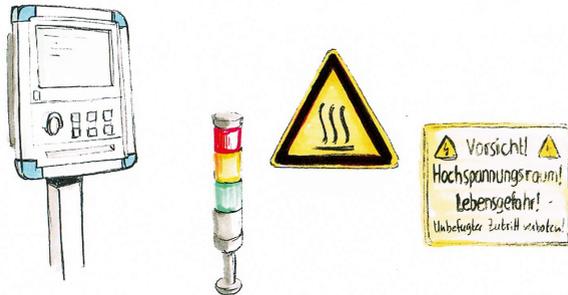


Abb. 4.1: Schematische Darstellung von Informationsquellen im Fahrzeugwerk (eigene Darstellung).

### 4.1.1 Steuermodule

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Steuerungskomponenten beschränkt sich diese Arbeit auf die in der Expertenbefragung evaluierten Systeme. Es werden Taster, Gesten- sowie Sprachsteuerung und sensitive Flächen (bspw. Touch-Screens oder Trittmatten) für den industriellen Einsatz favorisiert (vgl. Abb. 3.3). Um die vier Konzepte hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit vergleichen zu können, wird eine theoretische Eignungsbewertung durchgeführt. Diese basiert auf Einflussfaktoren, die aus der Literatur herangezogen werden (Grasso, Ebert & Finin, 1998; Baudel & Beaudouin-Lafon, 1993; Norman & Nielsen, 2010; Wachs, Kölsch, Stern & Edan, 2011). Es ergeben sich sieben Faktoren, nach denen die Konzepte bewertet werden (Effizienz der Bedienung, Ortsbindung bei der Bedienung, Anthropomorphismus bzw. Natürlichkeit der Interaktion, Abhängigkeit des Systems vom Nutzer, technische Komplexität der Schnittstelle, intuitive Bedienbarkeit und Flexibilität der Schnittstelle in Bezug auf verschiedene Eingabemöglichkeiten). Die daraus resultierende Evaluation zeigt Abbildung Abb. 4.2. Die Konzepte Taster und sensitive Fläche weisen die gleiche Bewertung auf. Da sich das Bedienkonzept beider Varianten gleicht, ist keine deutliche Differenzierung zu erwarten. Aus diesem Grund wird nur ein Konzept weiterverfolgt. Hierbei ist die Bewertung der Experten ausschlaggebend, die das Konzept des Tasters für geeigneter erachten (vgl. Abb. 3.3). Gesten- und Sprachsteuerung gleichen sich bis auf den Faktor Effizienz, womit die Sprachsteuerung bzgl. der Gebrauchstauglichkeit leicht besser abschneidet als die anderen Konzepte. Gesten- und Sprachsteuerung benötigen keine direkte Nähe zu einem Bedienelement, unterscheiden sich jedoch in der Art der Informationsabgabe. Beide Konzepte differenzieren sich zudem kaum in der Bewertung der Experten. Aufgrund der natürlichen Art der Interaktion, der in der EFFIROB Studie ein hohes Potential für MRI Anwendungen zugeschrieben wird (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011), werden beide Schnittstellen betrachtet.

				
Effizienz	+	-	+	+
Ortsbindung	-	+	+	-
Natürlichkeit	-	+	+	-
Abhängigkeit vom Nutzer	+	-	-	+
Komplexität	+	-	-	+
Intuitivität	+	+	+	+
Flexibilität	-	+	+	-

Abb. 4.2: Bewertung der Steuerungskonzepte Taster, Gestensteuerung, Sprachsteuerung und sensitive Flächen basierend auf Grasso, Ebert und Finin (1998), Baudel und Beaudouin-Lafon (1993), Norman und Nielsen (2010) sowie Wachs, Kölsch, Stern und Edan (2011).

Wie in Kap. 2.2.2 vorgestellt, kann die Realisierung von Gesten- und Sprachsteuerung über eine Reihe von verschiedenen Ansätzen erfolgen. Diese werden vor dem Hintergrund des Einsatzes in der Produktionsumgebung theoretisch evaluiert und die resultierenden Konzepte im Folgenden vorgestellt. Das Konzept des Tasters kann mittels konventionell verfügbarer Technik in Form eines Grobhandtasters (Buzzer) der Fa. Eaton implementiert werden, weshalb auf eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise verzichtet wird. Der Grobhandtaster ist in Abbildung Abb. 4.3 dargestellt.



Abb. 4.3: Für die Versuche verwendeter Buzzer der Fa. Eaton (Eaton, 2018).

#### 4.1.1.1 Gestensteuerung

Die Realisierung einer Gestenerkennung zur Steuerung einer Maschine erfordert zu Beginn die Definition der Art der Geste sowie deren Darstellungsform. Das heißt, es wird festgelegt, welche Art von Geste zur Informationsabgabe verwendet und von welchem Körperteil diese dargestellt wird. Zudem ist zu definieren, auf welche Weise die Geste erfasst wird. Nach heutigem Stand der Technik existieren zwei Varianten, der sensor- und der kamerabasierte Ansatz. Beide Ansätze ermöglichen die Identifizierung von statischen oder dynamischen Gesten, die per Hand oder dem Körper dargestellt werden. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Varianten der festzulegenden Kriterien.

Tab. 4.1: *Parameter einer Gestensteuerung und deren Ausprägungen basierend auf Preim und Dachselt (2015)*

<b>Art der Geste</b>	<b>Form der Geste</b>	<b>Art der Erfassung</b>	<b>Art der Darstellung</b>
Deiktisch	Körpergeste	Kamerabasiert	Statisch
Symbolisch	Gesichtsgeste	Sensorbasiert	Dynamisch
Manipulativ	Freihandgeste		
Zeichensprache	Fingergeste		
	Augengeste		
	Kopfgeste		

In der Literatur werden verschiedene Gestenformen für industrielle Szenarien verwendet, Barattini, Morand und Robertson (2012) testen Körpergesten zur Steuerung eines mobilen Roboters und Gleeson et al. (2013) nutzen Fingergesten für eine Montageaufgabe. In dieser Arbeit wird ein Ansatz gewählt, der symbolische Fingergesten in statischer Darstellung über ein Kamerasystem erfasst. Dieser entspricht der Vorgabe einer intuitiv sowie menschenzentriert gestalteten Schnittstelle, die es dem Menschen ermöglicht, ohne Hilfsmittel, wie z. B. Handschuhe oder Marker, Information zu übermitteln. Die Wahl der Fingergesten ist durch die Datenschutzproblematik

beim Einsatz von Kamerasystemen in der Produktion bedingt. Um Körpergesten zu erfassen, muss sich in der Regel der gesamte Körper des Menschen im Blickfeld der Kamera befinden (vgl. Barattini, Morand & Robertson, 2012).

Bei Fingergesten ist die Aufnahme der Hand ausreichend, was die Abgabe von Befehlen erleichtert und den Menschen besser vor der Erfassung personenbezogener Daten schützt. Für die Identifizierung der Gesten ohne frontale Aufnahme des Menschen wird das Blickfeld der Kamera vertikal ausgerichtet. Die Positionierung des Blickfelds der Kamera wird von oben herab gewählt, da dieses von Werker, Bauteilen oder abgelegten Werkzeugen nicht verdeckt werden kann. Eine Methode zur Erfassung von Fingergesten aus der Vogelperspektive beschreibt Pielmeier (2016). Im Folgenden wird eine Einführung in die Kernelemente des Ansatzes gegeben, für detailliertere Information wird auf die Arbeit von Pielmeier (2016) verwiesen.

Zur Segmentierung und Extraktion von Merkmalen wird das Bild der Tiefenkamera *Kinect* von Microsoft genutzt (vgl. Suarez & Murphy, 2012). Die Segmentierung des Gestenraums erfolgt anhand des Grauwertbildes der Kinect Kamera (vgl. Abb. 4.4 (a)), aus dem primär Gestenraum und Handkontur freigestellt werden. Die Segmentierung wird durch die Ermittlung des Armtiefenbildes (Abbildung Abb. 4.4 (b)) und einer Konturanalyse für die nachfolgende Merkmalsextraktion abgeschlossen. Die Merkmalsextraktion aus der segmentierten Hand erfolgt über die Bestimmung von sog. High- und Low-Level-Merkmalen. Die Klassifikation der Geste kann unter anderem über die Anzahl der Finger, den Handmittelpunkt sowie die Kontur der Hand erfolgen. Die Merkmale, die zur Extraktion genutzt werden, sind in Abbildung Abb. 4.5 (a) dargestellt.

Die Klassifikation der Merkmale einer Geste wird über Verfahren des überwachten Lernens im Bereich des maschinellen Lernens realisiert (Pielmeier, 2016). Hierzu wird ein *Artificial Neural Network* genutzt, das über die Vorgabe von Merkmalsvektoren sowie den entsprechenden Gesten die Klas-

sifikation erlernt und in diesem Zusammenhang gute Ergebnisse aufweist (Premaratne, 2014). Abbildung Abb. 4.5 (b) zeigt beispielhaft die Architektur des neuronalen Netzwerks.



(a)

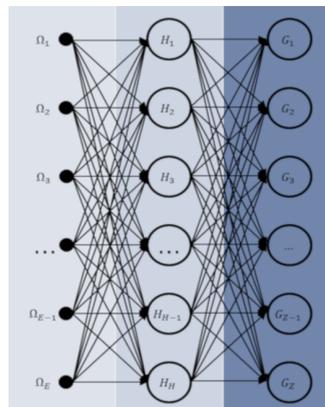


(b)

Abb. 4.4: Verschiedene Stufen der Handsegmentierung nach Pielmeier (2016); (a) Tiefenbild der Kinect, (b) Armtiefen- und Distanzbild.



(a)



(b)

Abb. 4.5: Merkmalsextraktion und Klassifikation nach Pielmeier (2016); (a) Merkmale der segmentierten Hand, (b) Architektur des Artificial Neural Networks zur Klassifizierung von Handgesten.

### 4.1.1.2 Sprachsteuerung

Die Konzeption einer Spracherkennung erfordert ebenfalls die Wahl geeigneter Parameter. Es ist zu definieren, welche Art von Sprache erkannt werden soll und mit welchem technischen Ansatz dies erfolgt. Zudem muss beachtet werden, welche Benutzergruppe angesprochen wird und ob die Benutzer wechseln. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Ausprägungen, die für die Spezifizierung des Spracherkennungssystems definiert werden.

Tab. 4.2: *Parameter einer Sprachsteuerung und deren Ausprägungen basierend auf Pfister und Kaufmann (2017)*

<b>Art der Spracheingabe</b>	<b>Art der Spracherkennung</b>	<b>Benutzergruppe</b>	<b>Benutzer</b>
Formelle Sprache	Lokaler Ansatz	Laien	Wechselnd
Natürliche Sprache	Serverbasierter Ansatz	Experten	Gleichbleibend
	Hybrider Ansatz		

Der Einsatz der Schnittstelle im Produktionsumfeld erfordert eine schnelle Reaktion auf Anweisungen, die von unterschiedlichen Personen in einer lauten Umgebung auf eine natürliche Art und Weise gesprochen werden. Somit ergibt sich für das Spracherkennungssystem die Anforderung, natürliche Sprache von unterschiedlichen Personen, die der Gruppe der Laien zuzuordnen sind, zu erkennen. Um diese zu erfüllen, wird der hybride Ansatz gewählt. Dieser verbindet die Schnelligkeit der lokalen Systeme mit der Variabilität und Unabhängigkeit des Anwenders cloud-basierter Systeme. Die lokale Erkennung eines Schlüsselworts ermöglicht zudem eine Sicherheitsfunktion, um eine versehentliche Aktivierung des Roboters zu vermeiden bzw. im Falle einer Interaktion mit mehreren Robotern den Richtigen anzusprechen.

Für die Realisierung des hybriden Ansatzes werden zwei unterschiedliche Softwarekomponenten verwendet. Die Erkennung des Schlüsselworts wird über die gebührenfreie Software *CMUSphinx* der Carnegie Mellon Universi-

ty realisiert (CMUSphinx, 2017). Das lokale Spracherkennungssystem ist an verschiedene Umgebungsbedingungen anpassbar und aktiviert über die Nennung des Schlüsselworts die Spracherkennung des serverbasierten Systems. Die Analyse der Handlungsanweisungen an den Roboter wird über die Plattform *Nuance Mix* der Nuance Communications Inc. realisiert. Diese verfügt über ein sog. *natural language understanding* und kann damit Objekte aus natürlich gesprochener Sprache erkennen (Nuance Mix, 2015). Objekte bezeichnen in diesem Zusammenhang Worte oder Wortgruppen. Der Vorteil der Plattform besteht darin, dass der Nutzer mit dem Roboter kommunizieren kann, ohne spezifische Satzstrukturen lernen zu müssen. Zudem bietet das System den Vorteil, neben der Erkennung der gesprochenen Sprache direkt und ohne hohe Latenz auch die Intention des Gesprochenen zu analysieren (Nuance Mix, 2015). Dies ermöglicht, dass eine Anweisung des Menschen in Bezug auf eine Aufgabe des Roboters variiert werden kann. Eine Aktion kann dadurch über verschiedene Anweisungen ausgelöst werden, sofern die Intention des Gesagten mit der der Anweisung übereinstimmt.

#### **4.1.2 Informationsmodule**

Unter dem Begriff des Informationsmoduls werden alle Systeme zusammengefasst, die der Informationsübermittlung an den Menschen dienen. Diese helfen den Zustand einer Maschine abzuschätzen und unterstützen bei einer Kollaboration. Da mit Ausnahme der Robotersysteme *Baxter* und *Sawyer* (Rethink Robotics, 2017) an sensitiven Leichtbaurobotern keine Informationsmodule verfügbar sind, werden im Rahmen dieser Arbeit Konzepte für die MRI entwickelt. Grundlage der Konzeptfindung bildet, wie in Kap. 4.1.1, der Stand der Technik im Bereich der MRS (vgl. Kap. 2). Prinzipiell werden bei MMS die visuelle, die auditive und taktile Modalität genutzt, um mit dem Menschen zu kommunizieren. MMS, die in den Werken eingesetzt werden, haben eine klare Fokussierung auf die visuelle Informationsübermittlung. Dies ist dadurch bedingt, dass die Darstellung von Farben und

unterschiedlichen Zeichen es ermöglicht, Informationen klar und kompakt zu kommunizieren. Auditive Informationen werden als Warnsignal genutzt, da der Mensch diese, auch ohne darauf fokussiert zu sein, wahrnimmt. Dieser Fokus auf die visuelle Informationsübermittlung wird durch die Experten bestätigt (vgl. Abb. 3.2 sowie Abb. 3.8). Neben der genutzten Modalität gibt es weitere Einflussfaktoren, die zu definieren sind. Zum Beispiel ist zu unterscheiden, welche Art von Information übermittelt wird. Handelt es sich um eine allgemeine, unspezifische Information (z.B. Maschine ist im „normalen“ Betriebsmodus oder im Not-Aus-Zustand), oder um spezifische, zielgerichtete Information (z. B. Handlungsanweisungen in einem Arbeitsablauf). Auch die Art des Signals spielt eine Rolle, z. B. können über Lautsprecher Warnsignale (einfach) oder spezifische Sprachnachrichten (komplex) abgespielt werden. Eine Übersicht über die zu beachtenden Faktoren gibt Tabelle 4.3.

Tab. 4.3: *Konzeptionsparameter der Informationsmodule und deren Ausprägungen*

<b>Modalität</b>	<b>Übermittelte Information</b>	<b>Art des Signals</b>
Visuell	Unspezifisch	Einfach
Auditiv	Spezifisch	Komplex
Taktil		

Den bisher verwendeten Systemen und der Bewertung der Experten entsprechend, fokussiert sich die Entwicklung der Informationsmodule auf die visuelle und auditive Modalität. Da die Art des Signals sowie deren Intensität bei den Modulen adaptiv gestaltet wird, wird im Folgenden zwischen unspezifischen und spezifischen Informationsmodulen unterschieden. Die Berücksichtigung beider Kategorien ist aufgrund der unterschiedlichen Beziehung zu den in Interaktion tretenden Menschen (vgl. Abb. 2.4) erforderlich.

#### 4.1.2.1 Unspezifische Informationsmodule

Das Funktionsprinzip für eine unspezifische visuelle Informationsübertragung, wird von Systemen abgeleitet, die in den Automobilwerken bei Maschinen oder Flurförderfahrzeugen eine gleiche Aufgabe erfüllen. Zwei dieser Systeme zeigt Abbildung Abb. 4.6, der Gabelstapler übermittelt dem Menschen mit dem blauen Licht die Information, wohin er sich bei der Rückwärtsfahrt bewegt. Die Industrieampel zeigt den aktuellen Zustand der Maschine an. Beide Systeme werden von unbeteiligten Personen intuitiv verstanden und tragen somit zur Sicherheit in der Produktion bei. Auf Grundlage dessen und dem Verfahren zur Kommunikation zwischen einem Roboter und einem Menschen bei der Mensch-Roboter-Kooperation (Zaidan, Zehntner, Fuchs & Lahmar, 2014) wurde in Kooperation mit der Firma Cognition Factory das Informationsmodul der Leuchtringe entwickelt.



(a)



(b)

Abb. 4.6: Informationssysteme in der Produktion; (a) blaues Richtungslicht eines Gabelstaplers (Linde, 2011), (b) Skizze einer Industrieampel (eigene Darstellung).

Das System besteht aus vier Manschetten bzw. Leuchtringen, die auf die Roboterreihe der Firma Universal Robots angepasst sind und die Anzeige des aktuellen Zustands des Roboters sowie prozessbedingte Ereignisse ermöglichen. Die Funktionsweise der Leuchtringe ist in Abbildung Abb. 4.7 skiz-

ziert. Sie kommunizieren über eine Steuerungseinheit mittels einer TCP/IP Verbindung mit dem Robotercontroller und erhalten den Status des Roboters sowie Informationen aus dem Roboterprogramm. Letztere werden über verschiedene Farben, Muster und Lichtintensitäten visualisiert. Beispielsweise blinkt ein Roboter im sicheren Zustand (Not-Aus-Modus) grün, um dem Menschen zu symbolisieren, dass es ungefährlich ist in seine Nähe zu kommen und rot, wenn er sich im Betriebsmodus befindet und jederzeit bewegen kann. Auditive Systeme zur Erzeugung von Warnsignalen sind mit kommerziell verfügbaren Lautsprechersystemen darstellbar und werden in diesem Abschnitt nicht explizit aufgeführt.

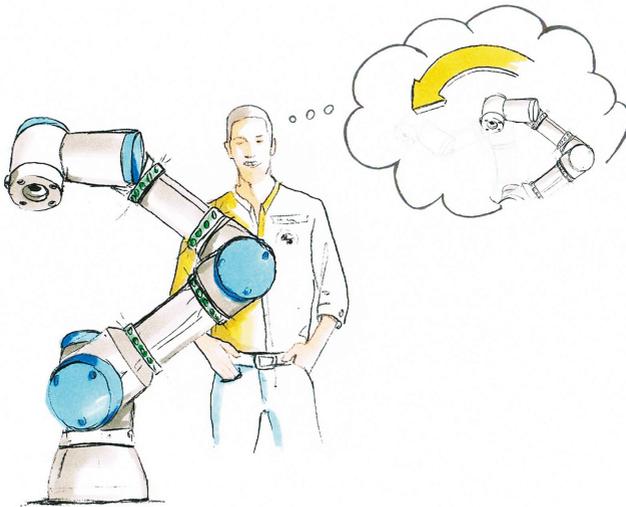


Abb. 4.7: Funktionsweise der Leuchtringe am Roboter zur Informationsübermittlung des Roboterzustands an den Menschen (eigene Darstellung).

#### 4.1.2.2 Spezifische Informationsmodule

Systeme zur spezifischen Informationsabgabe orientieren sich in der Konzeptfindung zum einen an der bisherigen Prozessvisualisierung über Bildschirme und zum anderen an auditiven Konzepten aus der Personal Service Robotik (PeSR). Ein Modul, das auf der Visualisierung der Information im Arbeitsbereich des Menschen mittels eines Projektors beruht, wird ebenfalls in Kooperation mit der Firma Cognition Factory entwickelt. Die Anbindung des Systems an die Robotersteuerung erfolgt über TCP/IP und ermöglicht es, die aktuellen bzw. kommenden Positionen des Roboters in den Arbeitsbereich des Menschen zu projizieren. Die Darstellung dieser spezifischen Information wird über die Robotersteuerung kontrolliert. Für den späteren Vergleich wird zudem ein Visualisierungsprogramm implementiert, das in gleicher Funktionsweise die einzelnen Prozessschritte des Roboters über einen Bildschirm darstellt. Es orientiert sich an den Systemen in der Produktion. Die Kommunikation mit dem Roboter erfolgt über das Modbus-Protokoll. Um es dem Roboter zu ermöglichen, über den auditiven Kanal mit dem Menschen zu kommunizieren, wird eine Schnittstelle entwickelt, die dem Menschen über konventionelle Lautsprecher Systeme Informationen des Roboters bereitstellt. Die Anweisungen werden auf einer Rechneinheit abgespeichert und können durch den Roboter abgerufen werden. Die Reihenfolge der ausgegebenen Information steuert das Ablaufprogramm des Roboters. Die Konzepte zur Informationsabgabe durch den Roboter via Leuchtringe, Projektion und Lautsprecher sind in Abbildung Abb. 4.8 visualisiert.

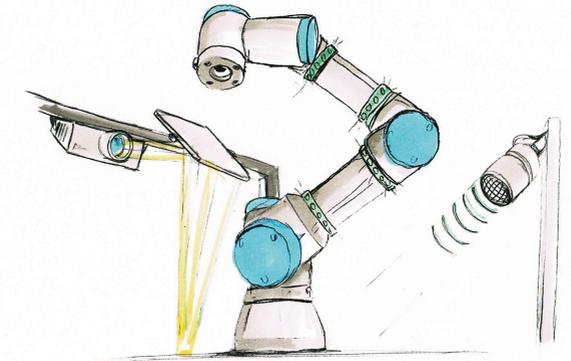


Abb. 4.8: Konzepte zur Informationsübermittlung für die Mensch-Roboter-Interaktion mittels Leuchtringen am Roboter (Visualisierung von dessen Zustand), Projektion per Beamer und Lautsprecher zur Bereitstellung von Handlungsanweisungen oder Warnungen (eigene Darstellung).

## 4.2 Systematik der Prozessinteraktionsanalyse

Die kontinuierliche Fließfertigung basiert auf der linearen Aneinanderreihung von Bearbeitungsstationen am Fließband, in den der von Menschen oder Maschinen durchgeführte Montageprozess abläuft (vgl. Kap. 2). Dieser linearen Prozesssystematik folgen die meisten koexistenten Applikationen in den Werken. Der Unterschied zu automatischen Montagestationen besteht lediglich im Wegfall des Schutzzauns. Für eine Zusammenarbeit von Mensch und Roboter innerhalb der Grenzen eines Montageprozesses muss neben der Sicherheit und der Tauglichkeit der Tätigkeit geprüft werden, welche Montageoperationen in welcher Reihenfolge aufeinander folgen, um das Potential für eine Kollaboration zu bestimmen. Basierend auf dieser Abfolge wird im Folgenden eine Systematik an Kenngrößen entwickelt, die die Interaktion im Prozess messbar macht sowie dazu dient, deren Gestaltung und Effizienz zu evaluieren.

Die Abfolge von Prozessschritten in einem Montageprozess wird über den Montagevorranggraph visualisiert. Dieser bildet die Vorrangbeziehungen der Prozessschritte ab und zeigt damit auf, welcher Schritt vor welchem erfolgen muss und welche parallel durchgeführt werden können. In der Theorie bieten die Prozesse das größte Potential, die einen hohen Anteil an parallel durchführbaren Prozessschritten besitzen. Abbildung Abb. 4.9 veranschaulicht dies beispielhaft. Dargestellt ist ein fiktiver Prozess mit fünf gleich langen Prozessschritten (PS), bei dem PS 1 und 2 sowie PS 3 und 4 von Mensch und Roboter parallel durchgeführt werden können. Die Prozesszeit verkürzt sich dementsprechend um die Differenz  $\Delta t$ .

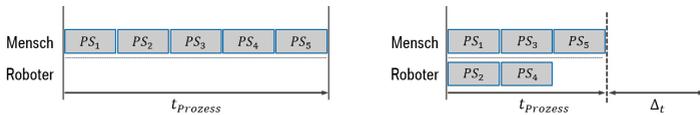


Abb. 4.9: Verkürzung der Montagezeit in einem fiktiven Prozess mit vier parallel durchführbaren Prozessschritten (PS).

Ausgehend von diesem idealen Modell, bei dem die Einsparung der Montagezeit maximal wird, zeigt Abbildung Abb. 4.10 Szenarien für Montageprozesse, in denen einzelne Schritte teilweise parallel durchgeführt (sich überlappen) oder aufgrund der Montagefolge nacheinander ausgeführt werden müssen. In Abbildung Abb. 4.10 (a) wird das ideale Modell aus Abbildung Abb. 4.9 mit der zugehörigen Montagevorrangfolge (rechts im Bild) dargestellt. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung Abb. 4.10 (b) ein Szenario, bei dem sich Mensch und Roboter im Montageprozess nacheinander abwechseln. Die Operationen werden der Vorrangfolge entsprechend ausgeführt, eine parallele Durchführung oder Überlappung der Prozessschritte besteht nicht. Das Modell in Abbildung Abb. 4.10 (c) stellt einen Montageprozess dar, bei dem sowohl eine Überlappung als auch eine Parallelisierung der Prozessschritte möglich ist. Es enthält eine funktionsbedingte Wartezeit, die in der Form dargestellt ist, dass der Roboter seinen Prozessschritt erst nach dem des Menschen beginnen kann. Diese Wartezeit kann durch ein Eintreten

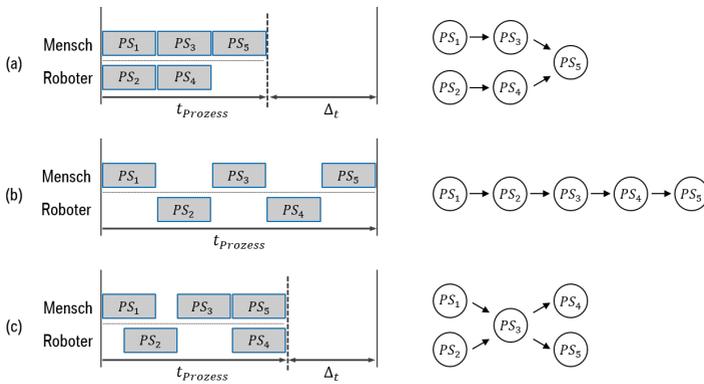


Abb. 4.10: Unterschiedliche Interaktionsmodelle von Mensch und Roboter in Abhängigkeit der Vorrangfolge der einzelnen Montageschritte (rechts); gezeigt anhand eines fiktiven Prozesses mit fünf Prozessschritten; (a) Ideales Modell mit vier parallel durchführbaren Prozessschritten; (b) Modell ohne parallel durchführbare Prozessschritte; (c) Modell mit überlappenden und parallel durchführbaren Prozessschritten.

des Menschen in den Sicherheitsbereich oder die montagebedingte Vorgehensweise bedingt sein. Die Betrachtung der Modelle zeigt, wie different die Zusammenarbeit in einem Prozess ausfallen kann. Für eine vergleichende Erfassung der Interaktion wird die Zeit als einheitliche, generische Kenngröße herangezogen. Dass die Zeit bzw. die verschiedenen Anteile von Mensch und Roboter an der Prozesszeit als objektive Messgröße zur Beschreibung der Interaktion verwendbar ist, wird bereits in den Studien von Hoffman (2013) sowie Unhelkar, Siu und Shah belegt (2014). Hoffman definiert in seiner Systematik zur Messung der *Fluency of Interaction* (Interaktionsfluss) in einer Mensch-Roboter-Kollaboration vier Zeitanteile, die in Tabelle 4.4 aufgelistet sind.

Unhelkar, Siu und Shah (2014) ergänzen auf Basis dieser Systematik bei der Untersuchung eines Hol-Bring-Szenarios mit einem mobilen Roboter die Interaktionszeit, als den Zeitanteil zwischen Ankunft und Abfahrt des Roboters beim Menschen.

Tab. 4.4: *Objektive Messgrößen zur Evaluation der Fluency of Interaction in einer Mensch-Roboter-Kollaboration nach Hoffman (2013)*

<b>Messgröße</b>	<b>Beschreibung</b>
Robot Idle Time	Zeitanteil der Prozesszeit, in dem der Roboter inaktiv ist.
Human Idle Time	Zeitanteil der Prozesszeit, in dem der Mensch inaktiv ist.
Concurrent Activity	Zeitanteil der Prozesszeit, in dem beide Partner agieren.
Functional Delay	Zeitanteil der Prozesszeit, in dem b. Partner inaktiv sind.

Die in dieser Arbeit entwickelte Systematik orientiert sich an beiden Studien und übernimmt in Anlehnung an Hoffmans Systematik die *Robot Idle Time* als *inaktive Zeit des Roboters* (IZR) sowie die *Human Idle Time* als *inaktive Zeit des Menschen* (IZM). Diese werden um ihr jeweiliges Gegenstück der *aktiven Zeit des Roboters* (AZR) und der *aktiven Zeit des Menschen* (AZM) ergänzt. Der Anteil *gleichzeitiger Aktivität* (GZA) als Teil der aktiven Zeiten (vgl. *Concurrent Activity* in Tabelle 4.4) wird in zwei Untergruppen aufgeteilt, die *Zeit direkter Interaktion* (ZDI) und die *Zeit indirekter Interaktion* (ZII). Die ZDI wird als Zeitanteil definiert, in dem beide Partner miteinander interagieren, beispielsweise bei der Übergabe von Bauteilen oder kollaborativen Operationen in der Montage. Die ZII beschreibt den Anteil der Zeit, in dem beide Partner gleichzeitig arbeiten, aber nicht aktiv miteinander interagieren. Der prozessverzögernde Zeitanteil (PVZ) bildet die Schnittmenge aus IZR und IZM. Sie definiert die Zeit, in der keiner der beiden Partner arbeitet. Die einzelnen Zeitmaße werden in Abbildung Abb. 4.11 anhand eines fünfteiligen Prozesses veranschaulicht. Aus den definierten Zeitanteilen lassen sich Kenngrößen zur Beschreibung der Interaktionseffizienz im Prozess ableiten. Zur Beschreibung des Verhältnisses von AZM zu IZM bzw. AZR zu IZR zur Gesamtprozesszeit (PZ) wird die menschliche Prozesseffizienz (MPE) sowie die Roboter-Prozesseffizienz (RPE) eingeführt.

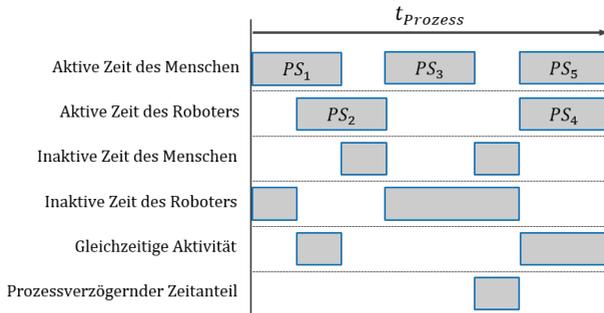


Abb. 4.11: Zeitmaße in einem beispielhaften Prozess mit fünf Prozessschritten (PS).

Beide Werte errechnen sich nach demselben Schema (siehe *Gleichung 4.1* und *4.2*) und beziehen sich auf den jeweiligen menschlichen Anteil bzw. den des oder der Roboter. Der Parameter  $n$  repräsentiert die Anzahl der Teilnehmer am Prozess (bspw.  $n = 2$ , für die Interaktion eines Menschen mit einem Roboter).

$$MPE = \frac{\sum_{i=1}^n AZM_i - IZM_i}{n \cdot PZ} \quad (4.1)$$

$$RPE = \frac{\sum_{i=1}^n AZR_i - IZR_i}{n \cdot PZ} \quad (4.2)$$

Das Verhältnis beider Kenngrößen ist für eine menschenzentrierte Interaktionsgestaltung von Bedeutung. Laut Studien ist zu beachten, den menschlichen Anteil in einer Kollaboration höher ausfallen zu lassen als den des Roboters. Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass Menschen präferieren, den Roboter warten zu lassen, als selbst warten zu müssen und zum anderen, dass ein zu hoher passiver Anteil eine unbefriedigende Wirkung auf Menschen hat (Unhelkar, Siu & Shah, 2014).

Um dieses Verhältnis zu beschreiben, wird die Kenngröße der Mensch-Roboter-Prozesseffizienz (MRPE) eingeführt. Diese kombiniert MPE und RPE zu einem Faktor und wird nach *Gleichung 4.3* berechnet:

$$MRPE = \frac{\sum_{i=1}^n (AZM_i - IZM_i) + (AZR_i - IZR_i)}{n \cdot PZ} \quad (4.3)$$

Die MRPE kann in Abhängigkeit der Zeitanteile von Mensch und Roboter Werte im Bereich von ]-1; 1[ annehmen. Wobei positive Werte für eine effiziente Prozessgestaltung sprechen und negative dagegen. Positive wie negative Werte außerhalb des Wertebereichs [-0.5; 0.5] sind theoretisch möglich, in der Praxis jedoch unrealistisch, da entweder der PVZ oder der GZA stark überwiegen muss. Insgesamt lassen sich fünf Wertebereiche identifizieren, über die eine Aussage zur Prozesseffizienz abgegeben wird. Tabelle 4.5 zeigt die Wertebereiche und erläutert deren Bedeutung.

Tab. 4.5: Wertebereiche der Mensch-Roboter-Prozesseffizienz und deren Interpretation

Wertebereich	MRPE
]-1; -0.5[	Stark negative MRPE, die untätigen Zeiten überwiegen mit einem großen PVZ. Der Kollaborationsprozess ist in hoch ineffizient.
]-0.5; 0[	Negative MRPE, die untätigen Zeiten überwiegen mit einem kleinen PVZ. Der Kollaborationsprozess ist ineffizient.
0	Neutrale MRPE, untätige und aktive Zeiten gleichen sich aus. Der Kollaborationsprozess ist weder effizient noch ineffizient.
]0; 0.5[	Positive MRPE, aktive Zeiten überwiegen mit einer kleinen GZA. Der Kollaborationsprozess ist effizient.
]0.5; 1[	Positive MRPE, aktive Zeiten überwiegen mit einer großen GZA. Der Kollaborationsprozess ist hoch effizient.

Die Aussage der MRPE kann anhand der Beispielprozesse aus Abbildung Abb. 4.10 veranschaulicht werden. Dabei gilt für jeden Prozessschritt eine einheitliche Zeitspanne. Das ideale Modell aus Abb. 4.10 (a) erhält nach der Berechnung über *Gleichung 4.3* eine MRPE von 0.67. Dies entspricht einem sehr gutem Wert, zeigt aber auch, dass eine MRPE  $> 0.5$  für reale Prozesse schwer zu erreichen sein wird. Das realistischere Prozessszenario in Abb. 4.10 (c) ergibt eine MRPE von 0.43 und bestätigt die obige Aussage, wobei der Wert von 0.43 bereits sehr gut ist. Wird der Prozess in Abb. 4.10 (b) betrachtet, ergibt sich durch den Ausgleich der aktiven und inaktiven Zeiten ein Wert von 0. Wie letzteres Beispiel zeigt, differenziert die MRPE nicht zwischen den aktiven bzw. passiven Anteilen der Prozessbeteiligten. Die MRPE beschreibt die Prozesseffizienz anhand der Zeitanteile beider Partner, bezieht in ihrer Aussage jedoch nicht den Ablauf der Kollaboration mit ein. Deshalb werden als Maß zur Beschreibung der Kollaboration im Prozess der Kollaborationsgrad  $\varphi_k$  und die Kollaborationseffizienz  $\vartheta_k$  eingeführt. Der Kollaborationsgrad gibt an, zu welchem Anteil der aktiven Zeiten die beiden Partner kollaborieren, sprich wie viele Prozessschritte parallel bzw. überlappend ausgeführt werden können. Er wird aus dem Verhältnis zwischen GZA und der Summe von AZR und AZM gebildet (vgl. *Gleichung 4.4*).

$$\varphi_k = \frac{GZA}{\sum_{i=1}^n AZR_i + AZM_i} \quad (4.4)$$

Wie im idealen Modell aus Abb. 4.10 (a) beschrieben, ist für eine effiziente Prozessgestaltung  $\varphi_k \rightarrow 1$  anzustreben, da die MRPE steigt, je mehr Prozessschritte gleichzeitig durchgeführt werden. Die Kollaborationseffizienz beschreibt die zeitliche Zusammensetzung der GZA bzw. das Verhältnis der Zeitanteile direkter und indirekter Interaktion (vgl. *Gleichung 4.5*). Sie gibt an, welchen Anteil die direkte Interaktion des Menschen mit dem Roboter an der gesamten Kollaboration einnimmt. Das heißt, dass der Zeitanteil, in dem Roboter und Mensch kommunizieren, oder Teile übergeben, in Verhältnis

zu dem Zeitanteil gesetzt wird, in dem beide parallel arbeiten. Unhelkar, Siu und Shah (2014) haben gezeigt, dass eine kürzere Interaktionszeit zu einer flüssigeren Interaktion führt, weshalb  $\vartheta_k \rightarrow 0$  anzustreben ist. Die Kollaborationseffizienz beschreibt somit den Interaktionsfluss im MRI-Prozess.

$$\vartheta_k = \frac{ZDI}{ZII} \quad (4.5)$$

Für die Beschreibung der effizienten Kollaboration wird der Kollaborationskoeffizient eingeführt, der beide Werte kombiniert und wie in *Gleichung 4.6* berechnet wird. Aufgrund der obigen Annahmen, ist für diesen  $\kappa_k \rightarrow 2$  anzustreben.

$$\kappa_k = \varphi_k + (1 - \vartheta_k) \quad (4.6)$$

Die Kenngrößen zur Erfassung der Kollaboration sowie der effizienten Prozessgestaltung erlauben es, über die Summe beider einen Faktor zu bilden, der sowohl die Zeitanteile als auch den Ablauf der Kollaboration in die Bewertung des interaktiven Prozesses integriert. Dieser Faktor wird Prozessinteraktionseffizienz (PIE) bezeichnet und berechnet sich wie folgt:

$$PIE = \kappa_k + MRPE \quad (4.7)$$

Basierend auf den entwickelten Kenngrößen zur Beschreibung der Interaktion in einem kollaborativen Arbeitsprozess lassen sich die in Tabelle 4.6 aufgeführten Empfehlungen für die Prozessgestaltung ableiten. Insbesondere ist darauf zu achten, dass der Kollaborationsgrad  $\varphi_k$  möglichst hoch ist und die Kollaborationseffizienz  $\vartheta_k$  darin einen niedrigen Wert erreicht. Somit ergibt sich für die PIE ein Wert  $\rightarrow +3$ , der als Vergleichswert zwischen MRI-Prozessen herangezogen werden kann.

Tab. 4.6: Empfehlungen für die interaktive Prozessgestaltung zwischen Mensch und Roboter

<b>Kennwert</b>	<b>Beschreibung</b>
$MPE > RPE$	Um untätige Zeiten des Menschen zu verhindern, ist die MPE stets größer zu halten als die RPE.
$MRPE \rightarrow 1$	Um für beide Partner einen effizienten Prozessablauf mit möglichst geringen Wartezeiten zu generieren, ist für die MRPE ein hoher positiver Wert anzustreben.
$\varphi_k \rightarrow 1$	Um die Prozesszeit durch paralleles Arbeiten zu minimieren, ist ein hoher Kollaborationsgrad anzustreben.
$\vartheta_k \rightarrow 0$	Um eine flüssige Interaktion während des kollaborierenden Zeitanteils zu erreichen, ist ein niedriger Wert für die Kollaborationseffizienz anzustreben.

### 4.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel umfasst die Konzeption von MRS anhand der identifizierten Anforderungen sowie die Entwicklung einer Systematik zur Beschreibung und Bewertung von kollaborativen Prozessen. Auf Grundlage der Handlungsempfehlung sowie der in Kapitel 3 erarbeiteten Anforderungen an eine MRS für den Einsatz in einer industriellen Umgebung werden in diesem Kapitel Konzepte ausgearbeitet und entwickelt. Die Konzeption der Schnittstelle erfolgt in getrennter Betrachtung von Modulen zur Steuerung des Roboters (Steuermodule) und Modulen, die der Informationsübertragung an den Menschen dienen (Informationsmodule). Anhand des Stands der Technik werden die von den Experten präferierten Steuerkonzepte evaluiert und drei Konzepte umgesetzt. Zwei von diesen, die Gesten- und die Sprachsteuerung, repräsentieren natürliche Benutzerschnittstellen. Die Konzepte der Informationsmodule orientieren sich an Mensch-Maschine-Schnittstellen aus dem Werksumfeld, deren Ansätze übernommen und für den Einsatz in der MRI angepasst werden. Die ausgearbeiteten Konzepte unterteilen sich in zwei unspezifische Module, die Informationen über den Zustand des Roboters bereitstellen, und in zwei spezifische Module, die komple-

xere Informationen über den Prozess an den Menschen übermitteln. Um kollaborative Prozesse messbar und effizient zu gestalten, wird im zweiten Abschnitt des Kapitels anhand der Struktur von Montageprozessen und bestehenden Ansätzen der Literatur eine Systematik zur Prozessinteraktionsanalyse abgeleitet. Diese basiert auf verschiedenen Zeitanteilen, die von Prozessteilnehmern entsprechend ihrer aktiven oder passiven Tätigkeit eingenommen werden. Aus diesen werden Kennzahlen ermittelt, über welche die Effizienz und die Interaktion des kollaborativen Prozesses beschreibbar sind. Anhand der entwickelten Kenngrößen wird abschließend eine Empfehlung für die Gestaltung eines kollaborativen Prozesses abgegeben.



## 5 Technische Evaluation der Schnittstellen

Die flüssige Interaktion zwischen Mensch und Roboter wird maßgeblich über eine intuitive und damit effiziente Kommunikation realisiert. Um die Gebrauchstauglichkeit der MRS für nachfolgende Untersuchungen sicherzustellen, werden Steuer- sowie Informationsmodule in getrennt voneinander durchgeführten, anwendungsunspezifischen Versuchen evaluiert. Dies ist erforderlich, da die in Kap. 4 konzipierten Schnittstellen im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden und eine negative Beeinflussung der Interaktion aufgrund von technischen Fehlern ausgeschlossen werden soll.

Hinsichtlich der Steuermodule wird die Gebrauchstauglichkeit als Fähigkeit der Schnittstelle definiert, die sicherstellt, dass eine zuverlässige, fehlerfreie Steuerung des Roboters in Form einer flüssigen Interaktion ohne Wartezeiten möglich ist. Bezogen auf die Informationsmodule beinhaltet diese die Fähigkeit der Module, die Wahrnehmung des Menschen so zu beeinflussen, dass Verständnis und Akzeptanz des Roboters gesteigert werden. Im Folgenden werden die Experimente mit ihren Zielgrößen vorgestellt und deren Methodik erläutert. Den Abschluss bildet jeweils die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse.

### 5.1 Experimentelle Evaluation der Eingabemodule

Für den Nutzer eines technischen Systems stellt die Rückmeldung auf seine Eingabe ein wichtiges Element der Funktionalität dar. Die Reaktionszeit, die das System benötigt, um auf Eingaben zu reagieren, wird unter den Einflussfaktoren der Expertenbefragung explizit hervorgehoben, wobei nach Risak (1986) zu beachten ist, dass die Zeitspanne dem Kontext entsprechend gewählt wird, da eine zu schnelle Reaktion den Menschen auch überfordern kann.

Zielsetzung der experimentellen Evaluation ist, zu prüfen, ob die konzipierten Schnittstellen von den Probanden als gebrauchstauglich empfunden

werden. Dies ist als zuverlässige und flüssige Benutzbarkeit der Schnittstelle definiert, womit als Zielgrößen die Reaktionszeit und die Zuverlässigkeit herangezogen werden. Die Reaktionszeit entspricht dem Zeitraum, in dem die Antwort des Roboters auf die Eingabe des Menschen erfolgt. Die Zuverlässigkeit prüft die Tauglichkeit der Schnittstelle bzgl. einer robusten Kommunikation. Das Steuermodul stellt die zu untersuchende Variable dar, die sich je nach Art der Befehlseingabe und der Umgebungsbedingungen auf die Zielgrößen auswirkt. Aufgrund der unterschiedlichen Natur der Steuermodule sind diese in ihren Abhängigkeiten differenziert zu betrachten, womit sich drei separate Untersuchungen ergeben.

### ***Steuermodul: Buzzer***

Da der Buzzer eine rein haptische Befehlseingabe besitzt und diese von den Umgebungsbedingungen nicht beeinflusst werden kann, wird er als Referenzgröße zur Bestimmung einer angemessenen Reaktionszeit herangezogen. Diese wird im ersten Experiment ermittelt und dient in den drauffolgenden als objektiver Richtwert.

### ***Steuermodul: Gestensteuerung***

Zuverlässigkeit und Reaktionszeit der Gestensteuerung hängen von der Erkennung der dargestellten Geste ab. Eine Differenzierung dieser anhand von unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ist, unter der Voraussetzung, dass die Hand des Benutzers das Blickfeld nicht verlässt, nicht zu erwarten. Die Zielgrößen hängen somit davon ab, wie leicht es dem Nutzer fällt, eine Geste korrekt darzustellen und wie gut das System die Darstellung identifiziert. Es ist zu erwarten, dass die Reaktionszeit des Roboters in Abhängigkeit zur gewählten Geste steht.

### ***Steuermodul: Sprachsteuerung***

Der Einsatz einer Sprachsteuerung in einem industriellen Umfeld ist aufgrund der Lautstärke Störeinflüssen ausgesetzt, womit die Zielgrößen sowohl

von der Art des Befehls als auch von den Umgebungsbedingungen abhängen (Herausforderung des noisy channel nach Jurafsky und Martin (2000)). Es ist zu untersuchen, in wie weit die Erkennung der Sprachanweisungen aufgrund unterschiedlicher Befehle und verschiedener Umgebungsbedingungen beeinflusst wird.

Die folgenden Abschnitte beinhalten die Erläuterungen zu Vorgehensweise und Ergebnissen der Experimente hinsichtlich der Bestimmung einer angemessenen Reaktionszeit des Roboters und der Evaluation der Gebrauchstauglichkeit von Gesten- und Sprachsteuerung. Hierzu wird auf die jeweilige Versuchsplanung, den experimentellen Aufbau, die Durchführung sowie die Stichprobe der einzelnen Experimente eingegangen. Die Dokumentation der Versuche erfolgt über Videos mit einer GoPro Hero 3+. Die Zustimmung der Probanden an einer Videoaufnahme wird im Vorfeld abgefragt. Bei den Experimenten wird darauf geachtet, eine möglichst heterogene Probandengruppe in Bezug auf Alter, Geschlecht und fachlichen Hintergrund zu schaffen, die aus mindestens zehn Teilnehmern besteht. Ziel ist es, deren subjektives Empfinden über die Reaktionszeit bzw. die Nutzung der Schnittstellen zu erfragen und die Ergebnisse anhand dessen zu interpretieren. Es gilt herauszuarbeiten, welche Eigenschaften eine geringe Varianz in der Bewertung aufweisen, um die Schnittstellen für die nachfolgenden Experimente korrekt einzurichten. Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgt anhand der Programmiersprache R (Version 3.4.1) in der Umgebung RStudio. Als statistisch signifikant gilt ein Ergebnis dessen  $p$ -Wert kleiner als .05 ist.

### 5.1.1 Bestimmung der Reaktionszeit

Ziel dieses Experiments ist die Bestimmung einer für den Menschen akzeptablen Reaktionszeit des Roboters als Referenz für die Evaluation der anderen Schnittstellenkonzepte. Der Fokus auf den Faktor Reaktionszeit geht zum einen auf die Ergebnisse der Expertenbefragung (vgl. Abb. 3.4) und zum anderen darauf zurück, dass diese als unabhängiger Kennwert über alle Schnittstellen erfassbar ist. Andere Faktoren auf das subjektive Empfinden der Probanden, wie bspw. die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters oder die Distanz zwischen Mensch und Roboter werden konstant gehalten. Zur Erhebung des Referenzwerts wird deshalb der Buzzer als Steuermodul gewählt, da die Befehlseingabe über die analoge Verbindung zur Robotersteuerung robust gegenüber äußeren Einflüssen ist. Die Zielgröße des Versuchs stellt die subjektive Empfindung der Probanden bzgl. des variablen Faktors Reaktionszeit dar.

#### 5.1.1.1 Methodik

Im folgenden Abschnitt werden Versuchsaufbau, -durchführung und die Stichprobe beschrieben, die für den Versuch herangezogen werden.

#### Versuchsaufbau

Den experimentellen Aufbau zur Bestimmung der Reaktionszeit des Roboters auf die Eingabe des Menschen zeigt Abbildung Abb. 5.1. Es wird ein Roboterarm vom Typ UR5 der Firma Universal Robots verwendet, der auf einem Tisch montiert wird. Der Proband steht dem Roboter gegenüber und nutzt den Buzzer zur Steuerung des Roboters. Dieser ist analog über einen digitalen Eingang am Robotercontroller angeschlossen. Nach der Betätigung des Buzzers bewegt sich der Roboter von der Ausgangsposition (durchgezogene Darstellung) bis zu einer festgelegten Position gegenüber des Probanden (gestrichelte Darstellung). Nach nochmaligem Auslösen des Buzzers bewegt sich der Roboter zurück auf die Ausgangsposition.

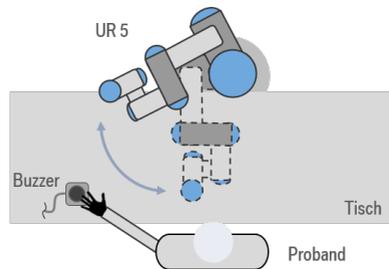


Abb. 5.1: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Reaktionszeit des Roboters mittels eines UR5 Roboters.

Die Erfassung der subjektiven Daten erfolgt über Fragen zur Bewertung der Reaktionszeit. Zum einen werden die unterschiedlichen Reaktionszeiten im Versuch hinsichtlich ihrer Akzeptanz durch die Probanden bewertet und zum anderen zwei allgemein gehaltene Fragen zur Bewertung gestellt. Diese erfolgt anhand einer sechsstufigen Likert-Skala von *trifft voll zu* bis *trifft gar nicht zu*. Tabelle 5.1 zeigt die Fragen zur Reaktionszeit, die zur Bewertung herangezogen werden.

Tab. 5.1: *Fragen zur Bewertung der Reaktionszeit des Roboters*

- |    |  |
|----|--|
| 1. | Ich halte die Reaktionszeit des Roboters auf meinen Befehl für einen wichtigen Faktor in der Zusammenarbeit. |
| 2. | Eine zu lange Reaktionszeit erachte ich als unangenehm bzw. störend.   |
| 3. | Eine zu kurze Reaktionszeit erachte ich als unangenehm bzw. störend.   |

### Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs erhalten die Probanden eine Einführung durch den Leiter des Experiments. Dieser bleibt während der gesamten Zeit in der Nähe und kann im Notfall eingreifen. Im Versuch werden die Probanden angewiesen den Roboter durch Betätigung des Buzzers zu steuern. Nach der ersten Betätigung bewegt sich der Roboterarm auf den Probanden zu, nach der zweiten geht dieser wieder auf seine Ausgangsposition zurück. Insgesamt muss der Buzzer sechs Mal gedrückt werden. Die Reaktionszeit

des Roboters wird dabei über eine einprogrammierte Latenz randomisiert, sodass der Roboter in seiner Reaktion in drei Abstufungen zeitlich variiert. Die Latenzzeiten betragen 0, 1 und 2 Sekunden auf die Eingabe des Probanden. Nach Abschluss des Experiments bewerten die Probanden die Reaktionszeiten des Roboters im Versuch sowie die allgemeinen Fragen.

### **Stichprobe**

Im Rahmen des Experiments nehmen  $N=15$  Probanden teil. Diese setzten sich aus Studenten, Mitarbeitern der BMW Group, Fertigungsmitarbeitern und fachfremden Personen im Alter von 21-55 Jahren zusammen. Davon sind  $N=5$  Personen weiblich und  $N=10$  Personen männlich. Bei der Datenerfassung traten keine Fehler auf, weshalb alle Daten analysiert werden.

#### **5.1.1.2 Ergebnis**

Die Auswertung der erhobenen Daten zur subjektiven Einschätzung der Reaktionszeit des Roboters erfolgt auf deskriptiver Basis. Diese dienen als Referenzwert und sind in ordinaler Form erfasst. Abbildung Abb. 5.2 zeigt die Ergebnisse der Befragung. Aus dieser gehen klare Differenzen zwischen den unterschiedlichen Reaktionszeiten hervor. Die kürzeste Zeit wird sowohl in den Fragen zum Versuch ( $SD_{RZ1} = 0.74$ ) als auch im abschließenden Fragenblock einheitlich präferiert und als wichtiger Faktor betrachtet. Dies wird durch die eindeutige Verneinung der längeren *Reaktionszeit 3* ( $SD_{RZ3} = 0.74$ ) bestätigt. Zudem gibt die Mehrheit der Probanden an, dass bei diesem Aufbau eine kurze Reaktionszeit nicht unangenehm wahrgenommen wird. Als Referenzwert resultiert eine möglichst kurze Reaktionszeit von kleiner einer Sekunde.

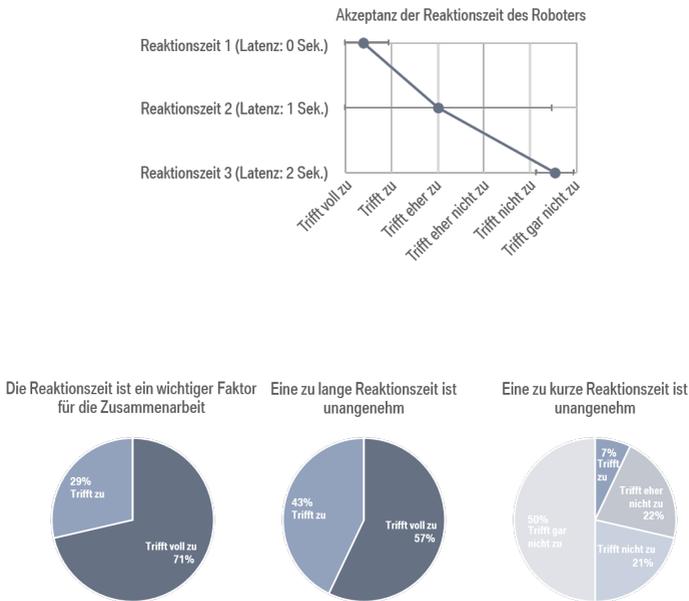


Abb. 5.2: Subjektive Bewertung der Reaktionszeiten des Roboters. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung des Mittelwertes der Stichproben an.

### 5.1.2 Evaluation der Gestensteuerung

Ziel der entwickelten Gestensteuerung ist, dass diese ein definiertes Gestenset zuverlässig und in einer angemessenen Reaktionszeit identifizieren kann. Im Experiment wird der Effekt der dargestellten Gesten auf die Zielgrößen Reaktionszeit und Zuverlässigkeit untersucht. Da die Geste von der Darstellung des Menschen abhängt, stellt diese den variablen Faktor dar. Für die Evaluierung der Abhängigkeiten wird ein einfaktorieller Versuchsplan aufgestellt. In diesem durchlaufen die Probanden nacheinander das Gestenset. Es besteht aus 13 Fingergesten, die aus einer Umfrage mit 52 Teilnehmern im Vorfeld der Untersuchung hervorgingen (siehe Pielmeier, 2016). In dieser wurden die Teilnehmer zu Gesten befragt, die sie in Bezug auf spezifische

Befehle der Arbeitsprozesssteuerung eines Roboters als geeignet empfinden. Die resultierenden Gesten sind *Fist*, *Stop*, *Flat Palm*, *Zero*, *Ok*, *Thumb Left*, *Thumb Right*, *Gun*, *Peace*, *Point*, *Phone*, *Rock* sowie *Pinch* und werden in Abbildung Abb. 5.3 dargestellt.

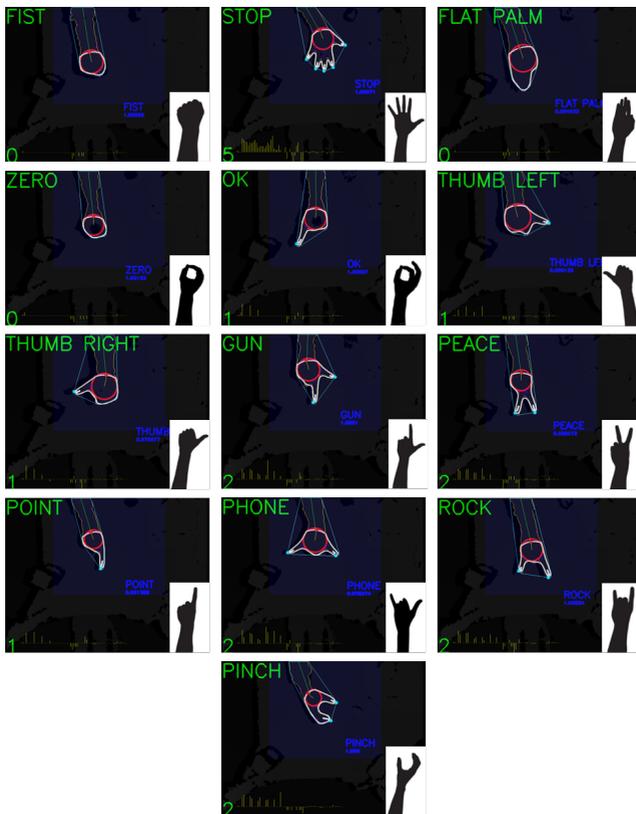


Abb. 5.3: Gestenset zur Evaluation der Gestensteuerung. Die Darstellung zeigt die Visualisierung der erkannten Geste durch das System auf einem Bildschirm (Anmerkung: Der Text links oben im Bild gibt die Klassifizierung der Geste an, links unten steht die Anzahl der erkannten Finger und rechts unten ist die entsprechende Geste in ihrer Silhouette abgebildet).

### 5.1.2.1 Methodik

Der folgende Abschnitt beschreibt Versuchsaufbau, -durchführung und Stichprobe, die für die Evaluation der Gestensteuerung herangezogen werden.

#### Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wird der gleiche Aufbau wie im vorherigen Versuch genutzt (vgl. Abb. 5.1). Änderungen bestehen dahingehend, dass eine Microsoft *Kinect* Kamera am Überbau des Tisches fixiert wird, über die die Aufnahme der Gesten erfolgt. Das Blickfeld der Kamera ist von oben auf die Tischfläche gerichtet. Abbildung Abb. 5.4 zeigt dies (gestrichelte Darstellung) sowie die anderen Komponenten des Aufbaus. Die identifizierte Geste wird dem Probanden mittels des ebenfalls am Überbau installierten Bildschirms als Feedback angezeigt und setzt sich aus der Abbildung der Hand sowie der vom System erkannten Geste zusammen (vgl. Abb. 5.3). Bei Erkennung einer Geste kommuniziert die Gestensteuerung per Modbus-Protokoll mit der Robotersteuerung. Die Gestensteuerung stellt dabei den Slave, die Robotersteuerung den Master dar. Das Flussdiagramm der Architektur ist in Abbildung Abb. 5.4 abgebildet.

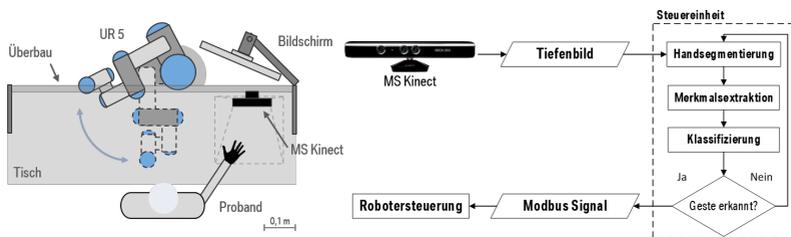


Abb. 5.4: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Reaktionszeit des Roboters auf Anweisungen per Fingergeste, die über eine Microsoft Kinect Kamera erfasst wird (links). Flussdiagramm der Steuerung des Roboters per Gestensteuerung (rechts).

Die Reaktionszeit der Gestensteuerung wird über die Zeitdauer zwischen Anweisung per Geste und Reaktion des Roboters gemessen und definiert den Zeitraum ab der ersten Darstellung der Geste durch den Probanden bis zur Erkennung durch die Gestensteuerung. Die Zuverlässigkeit ergibt sich über die Berechnung der Funktionsfehlerrate. Diese wird aus einer Kennzahl für die Wortfehlerrate bei der Evaluierung von Sprachsteuerungen abgeleitet (Pfister & Kaufmann, 2017) und setzt sich aus der Summe der Anzahl nicht erkannter  $n_{ne}$  und deshalb zu wiederholender Gesten, sowie falsch ausgeführter Anweisungen  $n_{fa}$ , dividiert durch die Gesamtanzahl aller Gesten  $n_{ges}$ , zusammen.

$$Funktionsfehlerrate = \frac{n_{ne} + n_{fa}}{n_{ges}} \cdot 100\%$$

In Ergänzung zur objektiven Datenerhebung wird die subjektive Wahrnehmung der Gestensteuerung durch den Probanden hinsichtlich der Zielgrößen über einen Fragenkatalog von fünf Fragen erfasst (vgl. Tabelle 5.2). Die Fragen werden anhand einer sechsstufigen Likert-Skala beantwortet, deren Abstufungen von *trifft voll zu* bis *trifft gar nicht zu* reichen.

---

Tab. 5.2: *Fragen zur Erfassung der subjektiven Wahrnehmung der Gestensteuerung*

---

1. Nach Erkennung der Geste hat der Roboter schnell auf meine Anweisung reagiert.
  2. Die Interaktion mit dem Roboter war intuitiv.
  3. Der Roboter hat den Befehl korrekt verstanden (Geste wurde korrekt erkannt).
  4. Der Roboter hat den Befehl korrekt ausgeführt (Die Aktion wurde korrekt ausgeführt).
  5. Es ist unangenehm oder störend, dem Roboter Anweisungen per Geste zu erteilen.
-

### **Versuchsdurchführung**

Zu Beginn des Experiments erhalten die Probanden eine Einweisung, welche Gesten verwendet werden und in welchem Bereich diese darzustellen sind. Sie erhalten danach die Möglichkeit, sich mit dem System vertraut zu machen und geben dem Versuchsleiter Rückmeldung, sobald sie bereit sind. Nach der Einführung beginnt die Datenerhebung und der Versuchsleiter weist die Probanden an, eine bestimmte Geste darzustellen, um den Roboter zu bewegen. Pro Proband wird das gesamte Gestenset (13 Gesten) zweimal in zufälliger Reihenfolge durchlaufen. Zwischen den Durchläufen besteht eine Pause von fünf Minuten. Nach Abschluss des Experiments erhält der Proband den Fragebogen und gibt seine subjektive Bewertung ab.

### **Stichprobe**

Am Experiment nehmen  $N=10$  Probanden im Alter zwischen 23-38 Jahren teil, die sich aus Studenten ( $N=4$ ) und Mitarbeitern der BMW Group ( $N=6$ ) zusammensetzen.  $N=2$  Personen waren weiblich und  $N=8$  Personen männlich. Bei der Datenerfassung traten keine Fehler auf, weshalb alle Daten für die Analyse verwertbar sind. Die erhobene Stichprobe enthält 20 Datensätze pro Geste und insgesamt 260 Datensätze.

#### **5.1.2.2 Ergebnis**

Aufgrund der verletzten Normalverteilungsannahme erfolgt die Auswertung der messwiederholten Daten über den Friedman-Test. In diesem wird der Effekt des Faktors Geste auf die Reaktionszeit untersucht. Die Ergebnisse werden in Abbildung Abb. 5.5 visualisiert.

Die Reaktionszeit des Roboters weist bzgl. der unterschiedlichen Gesten keinen signifikanten Unterschied auf ( $\chi^2 = 15.7, df = 12, p > .05, N = 10$ ). Die Betrachtung der Mittelwerte zeigt, dass die Reaktionszeit der Gesten zwischen 0.4 und 1.7 Sekunden variiert ( $SD_{Gestenset} = 1.51$ ). Der Mittelwert der Gesamtheit befindet sich im Bereich kleiner einer Sekunde

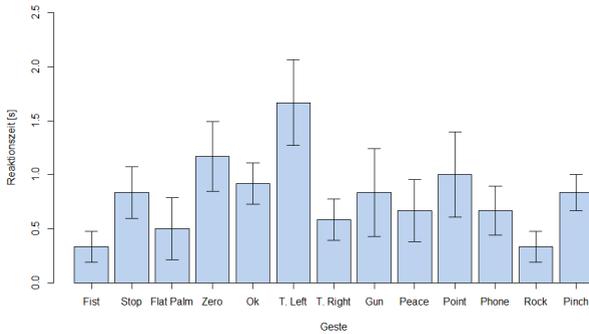


Abb. 5.5: Reaktionszeit des Robotersystems in Abhängigkeit der 13 definierten Gesten (N=10). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwertes der abhängigen Stichproben.

( $MW_{Gestenset} = 0.92$  Sekunden). Die größte Streuung weisen die Gesten *Thumb Left* ( $\sigma_{Thumb\ Left}^2 = 1.72$ ) und *Point* ( $\sigma_{Point}^2 = 1.5$ ) auf, letztere führte bei zwei Probanden zu Problemen in der Darstellung. Beide Ausreißer von mehr als zehn Sekunden Reaktionszeit sind in Abbildung Abb. 5.5 nicht miteinbezogen.

Die Funktionsfehlerrate liegt bei 135 identifizierten Gesten bei 0%. Es wurde keine Geste missverstanden bzw. falsch interpretiert. Die im Anschluss an das Experiment durchgeführte Befragung der Probanden bezüglich ihrer subjektiven Wahrnehmung gegenüber der Steuerung per Geste zeigt Abbildung Abb. 5.6. Die Interaktion mit dem Roboter wird von den Probanden als intuitiv ( $SD_{int. Interaktion} = 1.0$ ) und angenehm ( $SD_{unang. Interaktion} = 1.1$ ) empfunden. Die Reaktion des Roboters wird einheitlicher bewertet ( $SD_{schn. Reaktion} = SD_{kor. Erkennung} = SD_{kor. Ausführung} = 0.47$ ) und als schnell und zuverlässig wahrgenommen. Einige Probanden geben an, dass das Gestenset zu groß sei und für eine weitere Anwendung reduziert werden sollte.

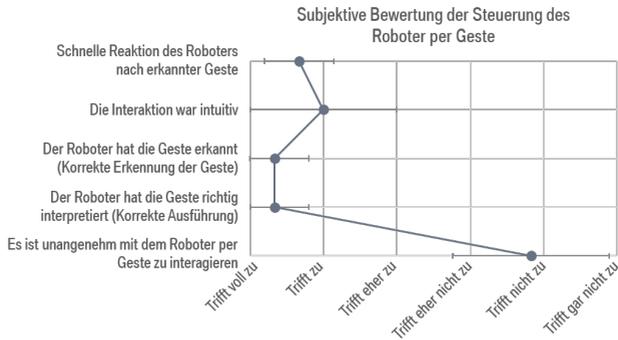


Abb. 5.6: Subjektive Bewertung der Gestensteuerung. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung des Mittelwertes der abhängigen Stichproben an (N=10).

### 5.1.3 Evaluation der Sprachsteuerung

Ziel der entwickelten Sprachsteuerung ist es, eine von äußeren Faktoren unabhängige und zuverlässige Erkennung von Sprachbefehlen bereitzustellen. Die unabhängigen Faktoren stellen in diesem Versuch die Lautstärke der Umgebung und der Sprachbefehl dar. Andere Faktoren, die eine Spracherkennung beeinflussen, werden aufgrund des verwendeten Systems von *Nuance Mix* und *CMUSphinx* (hohen Funktionalität und geringe Fehlerrate) nicht betrachtet. Um eine mögliche Abhängigkeit der Zielgrößen voneinander zu erfassen, wird ein zweifaktorielles Versuchsdesign definiert (vgl. Tabelle 5.3). Der Faktor Lautstärke wird über drei Ausprägungen, einem ruhigen Büroraum, einer Werkstatt und einer Fertigungshalle (während laufender Produktion) variiert. Der Faktor Sprachbefehl wird über fünf verschiedene Anweisungen an den Roboter verändert, dies entspricht fünf Faktorstufen. Diese generieren sich aus einem Pick-and-Place-Szenario und stammen aus den Wortfamilien für holen und bringen (vgl. Tabelle 5.3). Diese Befehle wurden gewählt, da sie einen typischen Arbeitsablauf eines Roboters in einer Assistenzfunktion mit einem Menschen repräsentieren. Es werden darin die Sprachbefehle genutzt, die allgemein für das Holen und Bereitstellen von

Gegenständen verwendet werden. Je Umgebungslautstärke ergeben sich fünf Durchläufe und 15 pro Proband, was bei einer Anzahl von  $N=14$  Probanden zu 210 Durchläufen führt. Diese werden entsprechend der in Tabelle 5.3 aufgeführten Reihenfolge durchgeführt.

Tab. 5.3: *Versuchsplan des Experiments zur Ermittlung der Reaktionszeit des Roboters mittels Sprachsteuerung in Abhängigkeit der Faktoren Umgebungslautstärke und Sprachanweisung (N=14)*

Umgebung	$MW_{SDP}$ in dB(A)	$SD_{SDP}$ in dB(A)	Sprachanweisung
Büro	50.8	0.91	A1 / A2 / A3 / A4 / A5
Werkstatt	61.5	1.13	A1 / A2 / A3 / A4 / A5
Fertigung	78.3	1.99	A1 / A2 / A3 / A4 / A5

*Anmerkung.* Aufgeführt sind der Mittelwert ( $MW$ ) und Standardabweichung ( $SD$ ) für den Schalldruckpegel ( $SDP$ ) sowie die Sprachanweisungen *Get some Haribo* (A1), *Put the Haribo back* (A2), *Pick up some chocolate* (A3), *Bring it to me* (A4) und *Deliver the mints to me* (A5).

### 5.1.3.1 Methodik

Der folgende Abschnitt unterteilt sich in die Beschreibung von Versuchsaufbau, -durchführung und Stichprobe, die zur Evaluation der Sprachsteuerung genutzt werden.

#### Versuchsaufbau

Den Experimentalaufbau stellt Abbildung Abb. 5.7 dar, er besteht aus einem mobilen Tisch, auf dem ein Roboter vom Typ UR10 sowie ein Bildschirm installiert sind. Letzterer dient der Visualisierung der Rückmeldung des Systems an den Probanden, der sich gegenüber des Bildschirms und seitlich des Roboters befindet. Zur Eingabe der Sprachanweisung wird das mobile Headset *Jabra Pro 920 Duo* verwendet. Die hybride Spracherkennung besteht aus der Kombination der Software *CMUSphinx* (Schlüsselworterkennung) und *Nuance Mix* (Erkennung der natürlichen Sprache).

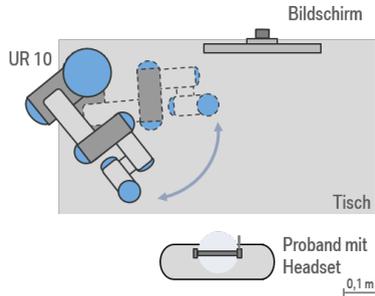


Abb. 5.7: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Reaktionszeit des Roboters auf Anweisungen per Sprache.

Die Anweisungen an den Roboter erfolgen in englischer Sprache, da das deutsche Sprachpaket von *Nuance Mix* zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht im gewünschten Umfang zur Verfügung stand. Die Steuerung des Roboters mittels Sprache erfolgt wie die Gestensteuerung über eine eigene Rechneinheit, die als Slave über das Modbus-Protokoll mit dem Roboter verbunden ist. Das schematische Flussdiagramm der Sprachsteuerung zeigt Abbildung Abb. 5.8.

Die Lautstärke wird als unabhängige Größe der Versuchsumgebung über das Schalldruckmessgerät *SL-100* der Firma Voltcraft in dB(A) gemessen. Die Reaktionszeit des Systems wird über den Zeitraum zwischen dem Ende der Befehlsabgabe und dem Start der Ausführung durch den Roboter (Dauer der Befehlsverarbeitung) erfasst. Die Zuverlässigkeit wird über die Funktionsfehlerrate gemessen. Abgeleitet aus der Wortfehlerrate (Pfister & Kaufmann, 2017) setzt sich diese aus der Summe der Anzahl nicht erkannter Anweisungen  $n_{ne}$  sowie falsch ausgeführter Anweisungen  $n_{fa}$ , dividiert durch die Gesamtanzahl aller Anweisungen  $n_{ges}$ , zusammen.

$$\text{Funktionsfehlerrate} = \frac{n_{ne} + n_{fa}}{n_{ges}} \cdot 100\%$$

Die Erfassung von subjektiven Daten bzgl. der Wahrnehmung der Sprachsteuerung erfolgt über einen Fragenkatalog. Die fünf Fragen zur Eignung

der Sprachsteuerung als Steuerschnittstelle werden über eine Likert-Skala beantwortet, die von *trifft voll zu* bis *trifft gar nicht zu* sechsstufig ausgeführt ist. Tabelle 5.4 listet die Fragen an die Probanden auf.

Tab. 5.4: *Fragen zur Erfassung der subjektiven Wahrnehmung der Robotersteuerung per Sprache*

1. Sobald der Roboter den Befehl verstanden hat, hat er schnell auf meine Anweisung reagiert.
2. Die Interaktion mit dem Roboter war intuitiv.
3. Der Roboter hat den Sprachbefehl korrekt verstanden (Konvertierung Sprache zu Text).
4. Der Roboter hat den Befehl korrekt ausgeführt (Die Aktion wurde korrekt ausgeführt).
5. Es ist unangenehm oder störend, dem Roboter Anweisungen per Sprache zu erteilen.

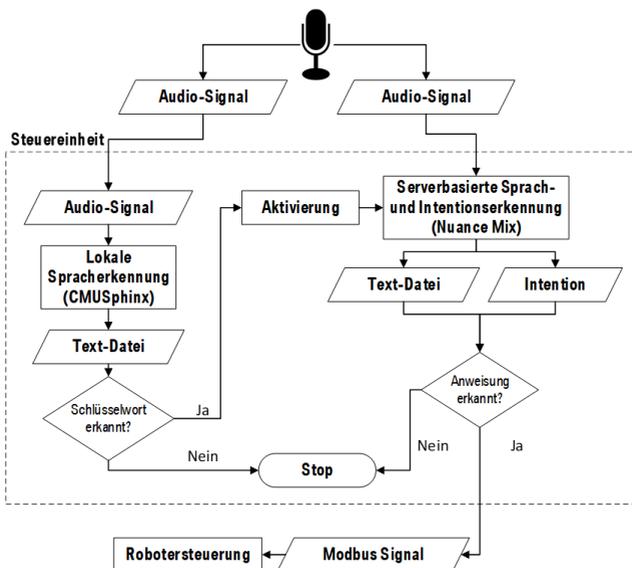


Abb. 5.8: Flussdiagramm der Steuerung des Roboters per Sprachsteuerung.

### **Versuchsdurchführung**

Das Experiment beginnt mit einer Einweisung der Probanden in die Funktion der Sprachsteuerung, den Versuchsablauf und die zu sprechenden Anweisungen. Jede Anweisung wird mit dem Schlüsselwort *Robot* begonnen, das die Spracherkennung aktiviert. Der Roboter bewegt sich nach einem erfolgreich abgegebenen Befehl von der Ausgangsposition (durchgezogene Darstellung in Abbildung Abb. 5.7) auf die gestrichelt dargestellte Position. Bei jedem Probanden wird vor der Befehlsabgabe der Schalldruckpegel gemessen, wodurch sich der Mittelwert je Umgebung ergibt (vgl. Tabelle 5.3). Die Befehlsblöcke werden dreimal in den unterschiedlichen Umgebungen wiederholt, die die Probanden nacheinander ausführen. Nach Abschluss des letzten Blocks beantworten die Probanden den Fragebogen.

### **Stichprobe**

N=14 Probanden nehmen an dem Experiment teil, die sich aus Studenten (N=10) und Mitarbeitern der BMW Group (N=4) im Alter zwischen 22 und 35 Jahren zusammensetzen. N=2 Personen waren weiblich und N=12 Personen männlich. Bei fünf Probanden traten während der Datenerfassung Fehler auf, weshalb lediglich neun Datensätze zur Analyse herangezogen werden. Die Fehler sind auf Störungen der Verbindung zwischen dem lokalen Teil der Sprachsteuerung mit dem serverbasierten und auf Fehler der Probanden in der Versuchsdurchführung zurückzuführen. Die daraus resultierende Verzögerung der Reaktionszeit bedingt den Ausschluss der Datensätze. In jeder der drei Umgebungen werden alle Sprachbefehle gesprochen, die erhobene Stichprobe enthält 36 Datensätze pro Befehl und Umgebung. Nach Abzug der fehlerhaften Daten bleiben für die Auswertung 135 Datensätze bestehen.

### 5.1.3.2 Ergebnis

Die Auswertung der messwiederholten Daten erfolgt nach Verletzung der Normalverteilungsannahme über den Friedman-Test. In diesem wird der Effekt der Varianten der beiden Faktoren Umgebung und Sprachanweisung auf die Reaktionszeit untersucht. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5.5 gezeigt und im Folgenden erläutert.

Tab. 5.5: Testergebnisse der Reaktionszeit in Abhängigkeit der Faktoren Umgebung und Sprachanweisung mittels Friedman-Test ( $N=9$ ). Angegeben sind der  $\chi^2$ -Wert, die Freiheitsgrade sowie die Wahrscheinlichkeit ( $p$ -Wert)

Effekt	$\chi^2$	$df$	$p$
Umgebung	3.6	2	>.05
Sprachanweisung	2.3	4	>.05
Umgebung x Sprachanweisung	10.9	14	>.05

Die Reaktionszeiten weisen weder einen signifikanten Unterschied in Abhängigkeit der drei Arbeitsumgebungen auf ( $\chi^2 = 3.6$ ,  $p > .05$ ) noch in Abhängigkeit der fünf Sprachanweisungen ( $\chi^2 = 2.3$ ,  $p > .05$ ). Die Interaktion beider Faktoren hat ebenfalls keinen signifikanten Effekt (vgl. Tabelle 5.5). Die Betrachtung der Mittelwerte in Abbildung Abb. 5.9 zeigt, dass die Reaktionszeit der Umgebung *Büro* ( $MW_{\text{Büro}} = 0.53$ ) und *Werkstatt* ( $MW_{\text{Werkstatt}} = 0.62$ ) unterhalb einer Sekunde liegen, die der Umgebung *Fertigung* ( $MW_{\text{Fertigung}} = 1.09$ ) leicht darüber. Letztere weist mit  $SE_{\text{Fertigung}} = 0.2$  die höchste Streuung auf. Die Mittelwerte der Reaktionszeiten in Abhängigkeit der fünf Anweisungen liegen, wie in Abbildung Abb. 5.9 zu sehen, alle unter einer Sekunde ( $MW_{\text{Anw. 5}} = 0.96$ ). Die größte Streuung ergibt sich für *Anweisung 5* ( $SE_{\text{Anw. 5}} = 0.25$ ). Die Betrachtung der Interaktion beider Faktoren zeigt, dass sich bei *Anweisung 3* in der Umgebung *Fertigung* der höchste Mittelwert ( $MW_{\text{Anw. 3, Fertigung}} = 1.67$ ) ergibt (vgl. Abb. 5.9, unten).

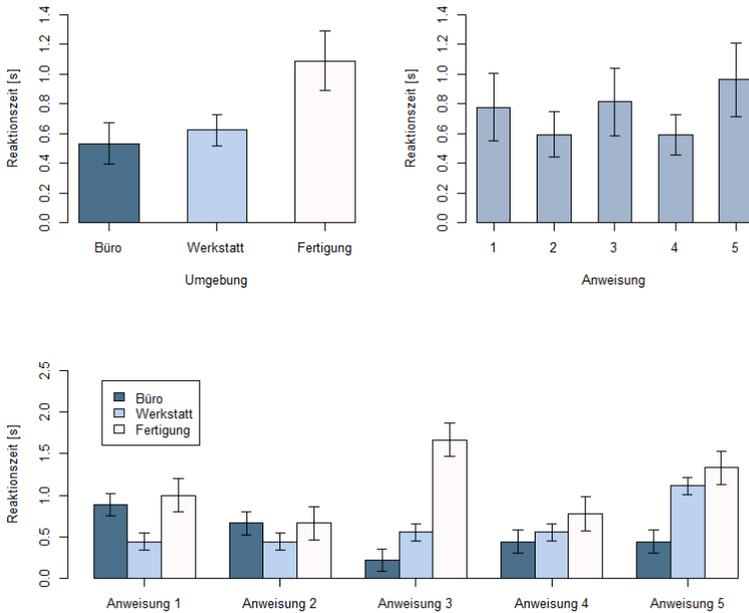


Abb. 5.9: Reaktionszeit des Roboters in Abhängigkeit des Faktors Umgebung (links oben), Anweisung (rechts oben) und der Interaktion beider Faktoren (unten). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwertes der abhängigen Stichproben (N=9). (Anw. 1: *Get some Haribo*; Anw. 2: *Put the Haribo back*; Anw. 3: *Pick up some chocolate*; Anw. 4: *Bring it to me*; Anw. 5: *Deliver the mints to me*).

Die Funktionsfehlerrate des Systems ergibt bei einer Gesamtzahl von 135 Handlungsanweisungen mit insgesamt zehn nicht erkannten und keiner falsch ausgeführten Anweisung eine Fehlerrate von 7.4%. Es entfallen jeweils vier nicht erkannte Anweisungen auf die Umgebung *Büro* sowie *Fertigung* (Fehlerrate = 8.8%) und zwei auf *Werkstatt* (Fehlerrate = 4.0%). Bei allen aufgetretenen Fehlern gibt das System (nach Aktivierung durch das Schlüsselwort) an, dass die Anweisung nicht mit der im System hinterlegten übereinstimmt. Was bedeutet, dass das System die Eingabe nicht verstan-

den hat. Die subjektive Bewertung der Sprachsteuerung zeigt Abbildung Abb. 5.10. Die Steuerung wird als intuitiv ( $SD_{\text{int. Interaktion}} = 0.64$ ) und angenehm ( $SD_{\text{unang. Interaktion}} = 0.89$ ) empfunden. Zudem wird das System von den Probanden als schnell ( $SD_{\text{schn. Reaktion}} = 0.49$ ) und mit geringer Fehleranfälligkeit ( $SD_{\text{kor. Erkennung}} = 0.62$ ,  $SD_{\text{kor. Ausführung}} = 0.86$ ) betrachtet.

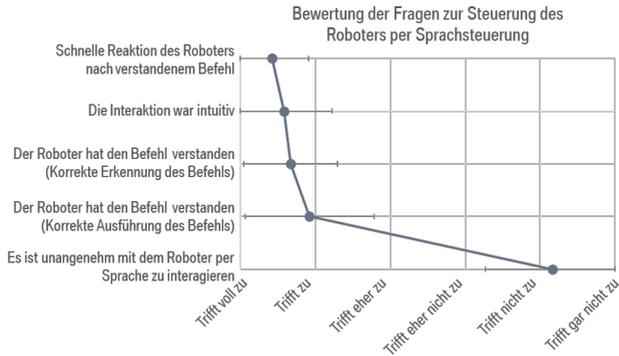


Abb. 5.10: Bewertung der Fragen zur Steuerung des Roboters über die Sprachsteuerung. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung des Mittelwertes der abhängigen Stichproben an (N=9).

### 5.1.4 Diskussion

Der in der Voruntersuchung ermittelte Referenzwert der Reaktionszeit des Roboters über den Buzzer liegt bei kleiner einer Sekunde. Dieser ist über die einheitliche Bewertung der Probanden aussagekräftig und wird als Vergleichswert für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet. Uneinigkeit besteht bei den Probanden bzgl. einer Latenz von 1 Sekunde, die Tendenz zur kurzen Reaktionszeit wird jedoch über die einheitlichen Bewertungen zur Latenz von 0 und 2 Sekunden bestätigt (vgl. Abb. 5.2). Der Referenzwert der Reaktionszeit von kleiner einer Sekunde wird von beiden anderen Steuersystemen (im Median) nur in einzelnen Fällen erreicht.

Wird der Referenzwert mit den Reaktionszeiten der einzelnen Gesten verglichen, stellt sich heraus, dass fünf Gesten mit dem Median von einer Sekunde diese Vorgabe nicht erfüllen. Demgegenüber steht die Auswertung der subjektiven Daten, in der die Probanden die Reaktionszeit trotz des Median von einer Sekunde (erhoben über die Gesamtheit aller gemessenen Zeiten) als angemessen empfinden ( $SD_{schm. \text{Reaktion}} = 0.47$ ). Dies lässt vermuten, dass die Probanden bei einer alternativen Steuerungsform oder durch die Rückspiegelung des Feedbacks auf dem Bildschirm weniger kritisch auf die Reaktion des Roboters reagieren. Die Kombination der erhobenen subjektiven und objektiven Daten zeigt, dass das System den Anforderungen an die Reaktionszeit genügt und die Erwartungen an ein intuitives Steuerungskonzept verifiziert. Hervorzuheben ist die Bedeutung der subjektiven Wahrnehmung, da die Nutzung trotz nicht erreichter objektiver Reaktionszeit positiv bewertet wurde. Die Beobachtungen bezüglich der Zuverlässigkeit bestätigen dem System eine sichere Funktion. Einige Gesten bereiteten den Probanden Schwierigkeiten bei der Darstellung (z.B. *Point* oder *Thumb Left*) und führen zu einer verzögerten, jedoch nie zu einer fehlerhaften Reaktion des Roboters. Damit die Benutzerfreundlichkeit des Systems nicht sinkt, sind für die Anwendung Gesten zu wählen, die von den Probanden schnell

und ohne großen Lernaufwand dargestellt werden können. Dies entspricht Gesten wie bspw. *Fist* ( $SE_{\text{Fist}} = 0.14$ ) oder *Flat Palm* ( $SE_{\text{Flat Palm}} = 0.27$ ) (vgl. Abbildung Abb. 5.5).

Die Daten des Experiments zur Sprachsteuerung zeigen, dass die Vermutung, die Reaktionszeit des konzipierten Systems sei von der Lautstärke in der getesteten Umgebung abhängig, statistisch wiederlegt werden kann. Die Funktionsfehlerrate ergibt mit einem Gesamtwert von 7.4% und mit den leicht höheren Werten von 8.8% in der Fertigungs- und Büroumgebung ein akzeptables, wenn auch verbesserungsfähiges Resultat. Die Forderungen der EFFIROB Studie nach einer Ausfallrate von kleiner 10% sind damit jedoch erfüllt (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011). Eine eindeutige Fehlerursache konnte in einer nachfolgenden Analyse nicht festgestellt werden. Die identische Fehlerrate von 8.8% in den Umgebungen Büro und Fertigung (Differenz von 27.5 dB(A)) bestätigt die Unabhängigkeit des Spracherkennungssystems von der Lautstärke und lässt vermuten, dass die Fehlfunktionen sprachbedingt sind. Grund dafür kann beispielsweise die inkorrekte Aussprache der englischen Begriffe sein. Die nachfolgende Videoanalyse ergibt, dass die Probanden den Befehl nach einem Fehler intuitiv wiederholten und dieser anschließend zu 100% vom System erkannt wird. Die einmalige Wiederholung des Befehls wird dabei nicht als störend empfunden. Die Analyse der Reaktionszeiten ergibt ein ähnliches Bild wie die der Gestensteuerung. Der Median der Reaktionszeit, der bei einer Sekunde liegt, wird von den Probanden im Gegensatz zum Referenzwert ebenfalls nicht als störend empfunden. Werden die subjektiven Daten der Befragung von Gesten- und Sprachsteuerung verglichen, zeigt sich ein ähnlicher Verlauf (vgl. Abbildung Abb. 5.11). Die Sprachsteuerung liegt in der Bewertung bei Reaktionsgeschwindigkeit und intuitiver Eingabe vor der Gestensteuerung. Dies deckt sich mit den objektiven Daten und den Streuungen der Bewertung ( $SD_{\text{int. Interaktion Sprache}} = 0.64$ ,  $SD_{\text{int. Interaktion Geste}} = 0.1$ ) und ist auf die Schwierigkeiten bei der Darstellung einiger Gesten zurückzuführen. Im Bereich der Funktionalität wird die Gestensteuerung leicht besser bewertet, was durch den Vergleich der

objektiven Fehlerraten und die Streuung der subjektiven Bewertung bestätigt wird. Eine eindeutige Präferenz gegenüber einer Steuerungsform kann aus den Daten nicht abgeleitet werden. Zusammenfassend haben Gesten- sowie Sprachsteuerung ihre Tauglichkeit in Bezug auf Reaktionszeit, Funktion und Akzeptanz bewiesen. Kritisch zu betrachten ist, dass die Systeme auf einer eigenen Entwicklung basieren, deren Funktionalität im Rahmen dieses Experiments (sowohl was den Umfang, als auch die Stichprobe betrifft) nicht vollumfänglich bewertet werden kann. Für die nachfolgenden Untersuchungen ergibt sich, dass durch die Steuermodule keine negativen Einflüsse auf die Interaktion mit dem Roboter zu erwarten sind und diese durch den Anwender akzeptiert werden.

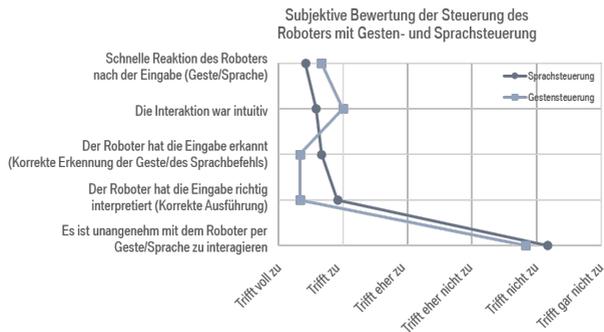


Abb. 5.11: Subjektive Bewertung der Eingabemodule Gesten- und Sprachsteuerung.

## 5.2 Gebrauchstauglichkeit der Informationsmodule

Die Wahrnehmung eines Roboters durch den Menschen wird über zahlreiche Einflussfaktoren bestimmt. Durchgeführte Studien zeigen, dass bei der Zusammenarbeit mit dem Roboter die Einhaltung der physikalischen Sicherheit des Menschen nicht ausreicht, um dessen empfundene Sicherheit zu gewährleisten (Lasota & Shah, 2015). Vielmehr wird diese durch das Verhalten des Roboters sowie soziale Aspekte beeinflusst. Hierbei sind die Distanz zwischen Mensch und Roboter, dessen Geschwindigkeit oder die Kommunikation einer bevorstehenden Aktion maßgeblich, die in Studien von Arai et al. (2010), Fischer et al. (2014) sowie Joosse et al. (2013) als signifikante Einflussfaktoren nachgewiesen werden. Beispielsweise zeigt sich anhand der Ergebnisse von Fischer et al. (2014), dass ein Roboter, der sich über einen Piep-Ton ankündigt, positiver empfunden wird, als einer ohne Ankündigung.

Im Rahmen des folgenden Experiments wird die Gebrauchstauglichkeit der Informationsmodule hinsichtlich ihres Effekts auf die Wahrnehmung des Menschen evaluiert. Dies beinhaltet sowohl die qualitative Untersuchung, ob und welche Informationsmodule die Wahrnehmung anderer Faktoren beeinflussen, als auch welche Form der Informationsübertragung zur Kommunikation mit dem Menschen am geeignetsten ist. Zielsetzung dabei ist, eine negative Beeinflussung der Interaktion durch die Art oder Menge an bereitgestellter Information zu identifizieren und dies für nachfolgende Untersuchungen auszuschließen. Zudem gilt es zu erörtern, ob sich die Module in ihrer Wahrnehmung differenzieren und ob das Verständnis des Roboters sowie das subjektive Sicherheitsempfinden durch den Einsatz der Module verbessert wird.

Um den Effekt der Module auf die Wahrnehmung zu evaluieren, sind zwei abhängige Versuche erforderlich, eine Referenzuntersuchung ohne den Einsatz der Module und eine mit diesen. Zielgröße ist die subjektive Wahrnehmung des Roboters durch den Probanden, der diese in Abhängigkeit der Fakto-

ren Geschwindigkeit, Distanz, Bewegungsbahn, Endposition des Roboters sowie Informationsart bewertet. Faktoren, wie die Gestalt des Roboters (vgl. Abb. 3.4) werden aufgrund des industriellen Fokus der Arbeit nicht betrachtet.

### **5.2.1 Methodik**

Die experimentelle Untersuchung besteht aus zwei Teilen, deren Methodik sich in Versuchsplanung, -aufbau sowie -durchführung untergliedert. Der erste Teil des Experiments dient der Schaffung eines Referenzwerts zur Wahrnehmung des Roboters durch die Probanden. Darin werden die Faktoren Geschwindigkeit, Distanz, Bewegungsbahn sowie Verfahrhöhe des Roboters hinsichtlich ihres Effekts auf die Wahrnehmung vorab evaluiert. Im zweiten Teil wird der Aufbau um die Interaktionsmodule erweitert und der Versuchsablauf in gleicher Weise wiederholt. Die erhobenen Daten des ersten Teils werden genutzt, um die Wahrnehmung der Interaktionsmodule im Vergleich zum Referenzwert betrachten zu können. In Anlehnung an Butler und Agah (2001) sowie Fischer et al. (2014) erfolgt die Datenerhebung in beiden Teilen über einen Fragebogen. In diesem wird die Empfindung der Probanden über eine mehrstufige Skala abgefragt. Zur Dokumentation der Versuche wird eine GoPro Hero 3+ Kamera genutzt. Die Probanden werden vor dem Experiment über die Videoaufnahmen informiert.

#### **5.2.1.1 Versuchsplanung**

In der theoretischen Vorüberlegung werden für den Versuch fünf Einflussfaktoren definiert. Die Faktoren Geschwindigkeit, Bewegungsbahn, Distanz und Endposition besitzen zwei Faktorstufen, der Faktor Informationsmodule fünf (vgl. Tabelle 5.6). Diese entsprechen den in Kap. 4.1 konzipierten Modulen. Da der Faktor Informationsmodule im ersten Teilversuch nicht betrachtet wird, ergeben sich nach einem vollfaktoriellen Versuchsplan je Proband acht Durchläufe. Durch die Integration der fünf Faktorstufen im

Tab. 5.6: *Faktoren und deren Abstufungen zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit der Informationsmodule*

Geschwindigkeit [mm/s]	Distanz [m]	Bewegungsbahn [-]	Endposition [m]	Informationsmodul [-]
$v_1$ (150)	$a_1$ (0.2)	Direkt	Brust (1.4)	Leuchtringe
$v_2$ (150)	$a_2$ (0.5)	Seite	Kopf (1.7)	Projektion Text Projektion Roboter Warnsignal Sprachmitteilung

zweiten Teil, erhöht sich die Anzahl der Durchläufe je Proband auf 40. Diese Anzahl ist von den Probanden zeitlich wie konzentrationsmäßig nicht darstellbar, weshalb die Probanden die Option erhalten die Bewertung des Informationsmoduls durchzuführen, sobald sie sich ihre Meinung gebildet haben. Dies ermöglicht die schlanke Durchführung des Experiments bei gleicher Bewertung. In beiden Teilen erfolgt die Variation der Einflussfaktoren in einer zufälligen Reihenfolge, um den Effekt der Gewöhnung auf die Bewertung zu minimieren.

Für den Faktor *Geschwindigkeit* werden die Abstufungen von 150 mm/s und 250 mm/s gewählt. Die *Distanz* zwischen Mensch und Roboter wird mit 0.2 und 0.5 m festgelegt. In der Sozialpsychologie wird eine Entfernung von 0.2 m der intimen und 0.5 m der persönlichen Distanz zugeordnet (Broszinsky-Schwabe, 2017). Letztere stellt die häufigste Distanz des Alltags dar, in der Menschen miteinander interagieren. Da bei MRI Anwendungen Mensch und Roboter gemeinsam im gleichen Arbeitsbereich arbeiten, sind beide definierten Distanzen möglich. Der Faktor *Bewegungsbahn* wird mit einem seitlichen Eintreten in den Arbeitsraum und einer frontalen Zufahrt variiert (vgl. Bewegungsbahn Seite / Direkt in Abschnitt 5.2.1.2), womit typische Bewegungen eines statisch fixierten Roboters abgebildet werden. Die Endpositionen *Brust* und *Kopf* des Roboterflanschs nehmen den Boden als Bezugsniveau und stellen mit einer Höhe von 1.4 m für *Brust* und

1.7 m für *Kopf* die jeweilige Endposition dar. Die Körpermaße sind aus der DIN 33402 (2015) abgeleitet und bilden den Durchschnitt von Frauen und Männern des 50sten Perzentils.

### 5.2.1.2 Versuchsaufbau

Der Experimentalaufbau basiert auf einem Roboter des Typs UR5, der auf einem Tisch installiert wird. Dieser wird verwendet, um die verschiedenen Faktoren (Bewegungsbahn, Geschwindigkeit und Endposition) darzustellen. Abbildung Abb. 5.12 zeigt den Aufbau sowie die Position des Probanden im ersten Teilversuch. Im zweiten Teil werden die Informationsmodule in den ansonsten unveränderten Aufbau integriert. Der Roboter wird mit Leuchtringen ausgestattet, das Beamermodul am Überbau des Tisches befestigt und der Lautsprecher installiert. Die Leuchtringe können über ihre Farbgebung Informationen über den Zustand des Roboters abgeben, über den Beamer werden Textsignale und/oder die Silhouette des Roboters auf den Tisch projiziert. Der Lautsprecher übermittelt über einfache Töne oder Sprachnachrichten Signale an den Probanden. *Einfach* steht für ein einfaches visuelles oder auditives Signal, wie ein Blinken oder ein Piep-Ton. *Komplex* für einen visuellen Schriftzug, der dem Probanden eingeblendet wird, bzw. eine Sprachnachricht. Abbildung Abb. 5.13 zeigt den Experimentalaufbau mit integrierten Informationsmodulen. Die Steuerung der Informationsmodule erfolgt über das Roboterprogramm, in das die einzelnen Module integriert sind.

Die Daten werden über einen Fragebogen erhoben, der vier Blöcke beinhaltet. Im ersten Teilversuch erfolgt die Evaluation über eine fünfstufige Likert-Skala, in dem die Probanden ihre Wahrnehmung bzgl. der Faktoren anhand der Adjektive *angenehm*, *akzeptabel*, *unangenehm*, *störend* und *verängstigend* bewerten (Block I.1). Im zweiten Block des ersten Teils (Block I.2) wird eine zusammenfassende Einschätzung der Probanden bzgl. des Einflusses der Faktoren auf ihr Empfinden in diesem experimentellen

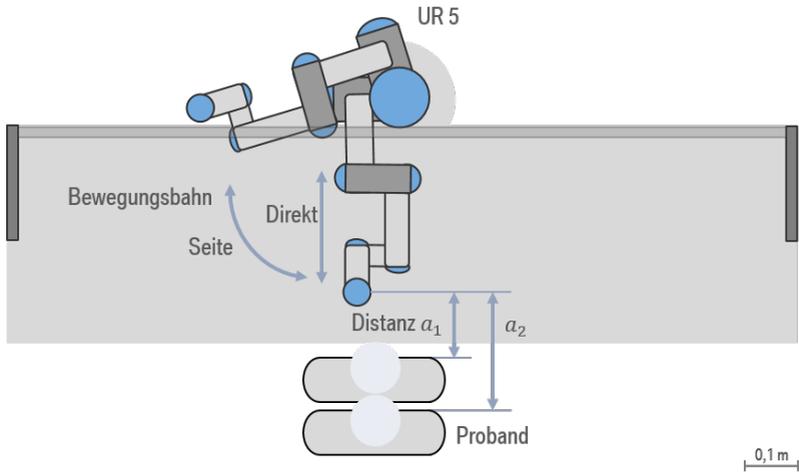


Abb. 5.12: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Einflussgrößen auf die Wahrnehmung des Menschen, dargestellt sind die Faktorstufen Seite/Direkt des Faktors Bewegungsbahn und  $a_1/a_2$  des Faktors Distanz.

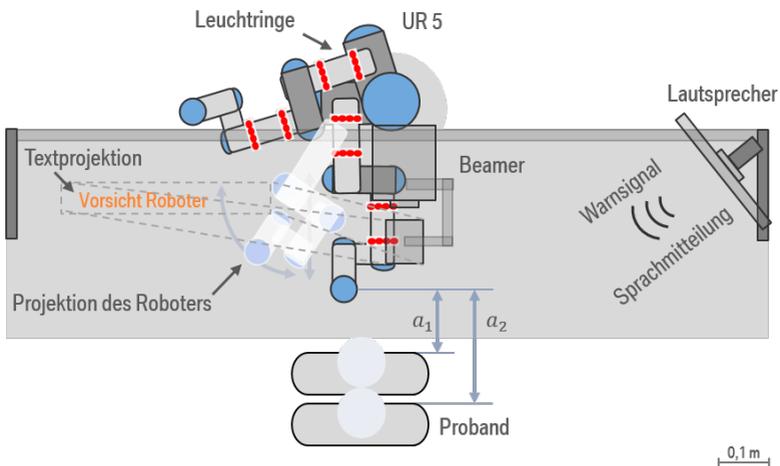


Abb. 5.13: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung des Einflusses der Informationsmodule auf die Wahrnehmung des Menschen, dargestellt sind die Module Leuchtringe, die visuelle Projektion des Roboters sowie eines Textes und der Lautsprecher, der Warnsignale und Sprachmittlungen abgeben kann.

Aufbau erfragt. Im zweiten Teil des Versuchs geben die Probanden an, ob die Zuschaltung der Informationsmodule sich auf ihre Wahrnehmung auswirkt. Falls eine Änderung wahrgenommen wird, wird diese in Bezug auf die Faktoren Geschwindigkeit, Distanz, Bewegungsbahn sowie Endposition im Sinne einer positiven bzw. negativen Veränderung erfragt (Block II.1). Zur Bewertung der Informationsmodule hinsichtlich ihrer Eignung zur Informationsbereitstellung, dient Block II.2. In dessen Fokus steht, welche Art der Informationsübermittlung durch den Menschen am geeignetsten wahrgenommen wird. Der Frageblock enthält zum einen Fragestellungen zu Verständnis und empfundener Sicherheit sowie zur Bewertung der verwendeten Modalität (visuell bzw. auditiv) und Komplexität der Ausführung (einfach bzw. komplex), die über eine sechsstufige Likert-Skala bewertet werden. Zum anderen wird die Evaluation der einzelnen Informationsmodule anhand des deutschen Notensystems von eins bis sechs erfragt (1: sehr gut; 6: ungenügend). Der vollständige Fragebogen ist im Anhang in Abbildung Abb. A.5 abgebildet.

### **5.2.1.3 Versuchsdurchführung**

Die Probanden erhalten zu Beginn des Experiments eine Einführung in Ablauf und Aufgaben. Die Steuerung des Roboters übernimmt der Versuchsleiter, der den Probanden in Abhängigkeit des Versuchsplans Anweisungen zu ihrer Position gibt. Die Evaluation jedes Durchlaufs erfolgt direkt im Anschluss an diesen (Block I.1). Zwischen erstem und zweitem Teil des Versuchs besteht eine Pause für die Umrüstung, in der die Probanden Frageblock I.2 bearbeiten. Nach der Integration der Informationsmodule erfolgt der zweite Teil des Experiments (Bewertung der Fragen von Block II.1), nach dessen Abschluss die Probanden den letzten Fragenblock (Block II.2) beantworten. Der Versuchsleiter steht bei eventuellen Zwischenfragen zur Verfügung.

Am Experiment sind  $N=16$  Probanden beteiligt, die sich aus Studierenden ( $N=7$ ), Beschäftigten der BMW Group ( $N=4$ ) und externen Personen ( $N=5$ ) zusammensetzen.  $N=2$  Personen sind weiblich und  $N=14$  Personen männlich. Bei einem Probanden trat während der Datenerfassung aufgrund von technischen Problemen ein Fehler auf, weshalb 15 Datensätze zur Analyse herangezogen werden.

### 5.2.2 Ergebnis

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der beiden Telexperimente präsentiert. Die Auswertung der subjektiven Daten in ordinaler Form erfolgt auf deskriptiver Basis.

#### 5.2.2.1 Wahrnehmung ohne Informationsmodule

Die deskriptive Auswertung der Daten des ersten Frageblocks zeigt Abbildung Abb. 5.14. In dieser werden die Verteilung der Bewertung sowie die Lage der Mediane in Abhängigkeit der acht untersuchten Bewegungsabläufe dargestellt. Es geht hervor, dass die Ausprägung des Faktors Abstand ( $SD_{\text{Abstand}} = 0.41$ ) als entscheidend für die Wahrnehmung der Probanden ist. Die Variation von Geschwindigkeit, Höhe der Endposition sowie Bewegungsbahn erscheint anhand der subjektiven Bewertung als weniger relevant und streut deutlich stärker.

Das Resultat des im Anschluss an Teilversuch I zu beantwortenden Frageblocks II zeigt Abbildung Abb. 5.15. Darin wird der Faktor Abstand als ausschlaggebend bestätigt. Geschwindigkeit und Höhe der Endposition erhalten eine ähnliche Bewertung, die um eine Bewertungseinheit geringer ausfällt als die des Faktors Abstand. Die Bewegungsbahn wird deutlich als schwächster Faktor bewertet und die Frage nach Information bzgl. des zukünftigen Verhaltens des Roboters klar positiv beantwortet.

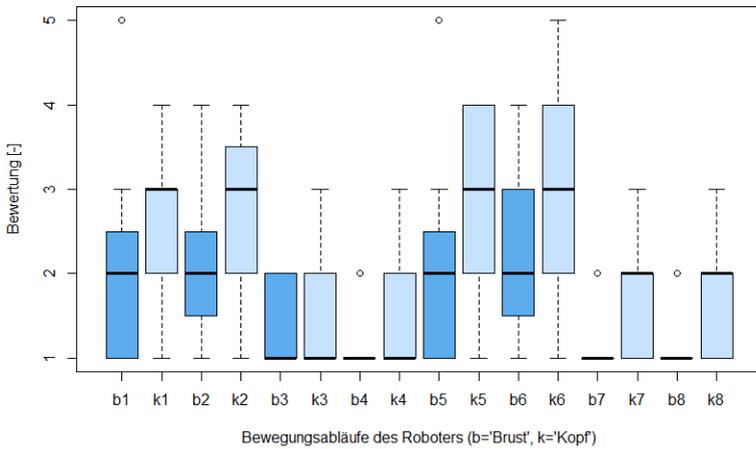


Abb. 5.14: Vergleich der Bewertung der acht Bewegungsabläufe des Roboters mit Endposition Brust und Kopf (Bewertungsskala: 1=angenehm, 2=akzeptabel, 3=unangenehm, 4=störend, 5=verärgstend).

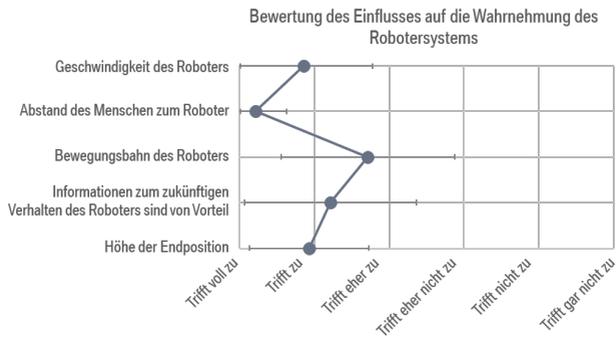


Abb. 5.15: Ergebnisse der Befragung zur subjektiven Einschätzung der Faktoren Geschwindigkeit, Abstand, Bewegungsbahn sowie Höhe der Endposition und deren Einfluss auf die Wahrnehmung der Probanden. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung des Mittelwertes der Stichproben an.

### 5.2.2.2 Wahrnehmung mit Informationsmodulen

Die Auswertung des Einflusses der Informationsmodule auf die Wahrnehmung der Probanden zeigt, dass nur das Konzept der Leuchtringe bei Faktor Endposition eine Veränderung der Wahrnehmung auslöst (siehe Abb. 5.16). Zudem zeigen die Leuchtringe die vergleichsweise höchste Zustimmung zu einer wahrgenommenen Veränderung. Den geringsten Anteil weist das Konzept der Textanzeige durch den Beamer auf. Die Analyse, ob die Veränderung positiv oder negativ wahrgenommen wird, ergibt zu 88% einen positiven Effekt.

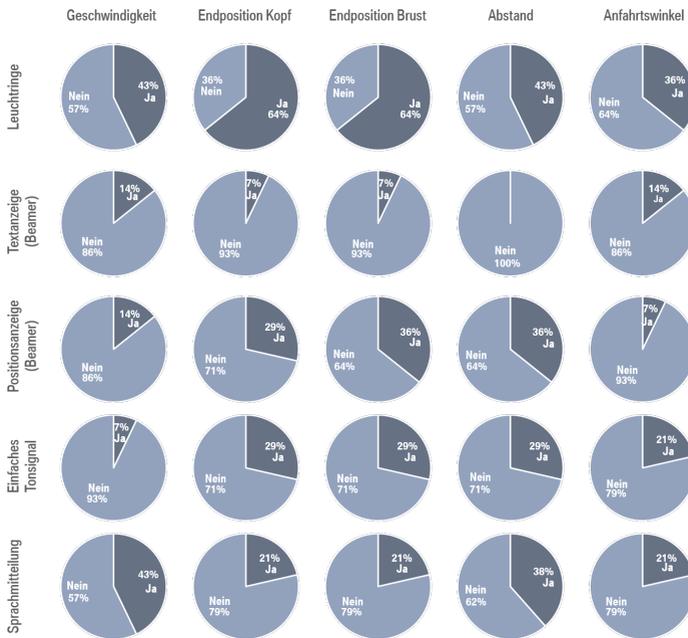


Abb. 5.16: Einfluss der Informationsmodule auf die Wahrnehmung der Faktoren Geschwindigkeit, Endposition Kopf/Brust, Abstand sowie Anfahrtswinkel auf die Frage, ob eine Änderung der Empfindung eintritt oder nicht.

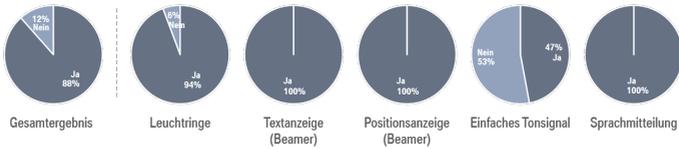


Abb. 5.17: Bewertung der Informationsmodule hinsichtlich einer angenehmer (=ja) bzw. unangenehmer (=nein) empfundenen Veränderung in ihrer Wahrnehmung.

Abbildung Abb. 5.17 zeigt die detaillierte Auswertung der Ergebnisse. Darin wird die Information über ein einfaches Tonsignal als unangenehmer empfunden. Die restlichen Konzepte werden zu einem sehr hohen Anteil positiv bewertet, was sich im Gesamtergebnis widerspiegelt.

Das Ergebnis der Befragung zu subjektivem Empfinden von Verständnis und Sicherheit sowie der Gestaltung der Informationsmodule (Block II.2) zeigen die Abbildungen Abb. 5.18 und Abb. 5.19. Der Effekt der Informationsmodule auf Verständnis und gefühlte Sicherheit wird klar positiv beantwortet ( $SD_{\text{Sicherheit}} = 0.62, SD_{\text{Verständnis}} = 0.70$ ). Einfache, visuelle Systeme ( $SD_{\text{einfach, visuell}} = 0.72$ ) werden im Vergleich zu komplexeren oder auditiven ( $SD_{\text{komplex, auditiv}} = 0.87$ ) als besser geeignet empfunden (vgl. Abb. 5.18).

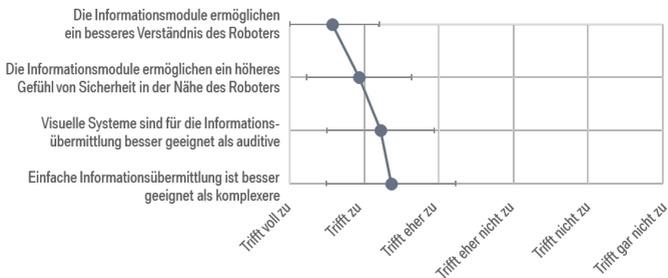


Abb. 5.18: Subjektive Empfindung von Verständnis und Sicherheit durch den Einsatz der Informationsmodule und Vergleich der Eigenschaften von Informationsmodulen, unterteilt in die Kategorien visuell/auditiv sowie einfach/komplex. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung des Mittelwertes der Stichproben an.

Diese Tendenz spiegelt sich auch in der Bewertung der Informationsmodule nach Schulnoten wieder. Die Ergebnisse zeigen, dass das visuelle und einfache Konzept der Leuchtringe mit einer Durchschnittsnote von 1.5 und einer Differenz von 1.9 zum zweitplatzierten am besten bewertet wird (vgl. Abbildung Abb. 5.19). Die anderen Konzepte liegen mit einer Gesamtdifferenz von 0.5 auf einem ausreichenden Niveau dicht beieinander. Innerhalb dieser Gruppe wird die Sprachmitteilung mit einer Bewertung von 3.4 am besten evaluiert.

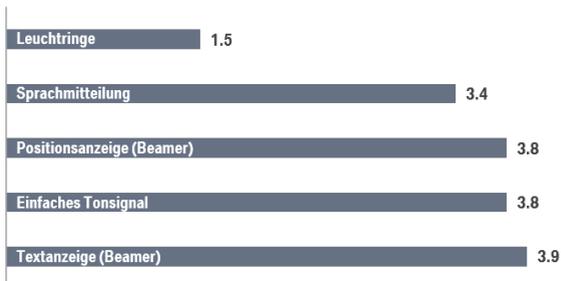


Abb. 5.19: Bewertung der Informationsmodule auf Basis von Schulnoten (1=sehr gut; 6=ungenügend).

### 5.2.3 Diskussion

Die Analyse der Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung des Menschen zeigt, dass der Faktor Distanz den größten Einfluss besitzt. Die Mediane zwischen den Faktorstufen liegen für den Abstand von 0.2 m bei unangenehm (Endposition *Kopf*) und akzeptabel (Endposition *Brust*), die bei einer Distanz von 0.5 m zwischen angenehm und akzeptabel (Endposition *Kopf*) sowie angenehm (Endposition *Brust*). Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass der Mensch die Geschwindigkeit (die im normativen Rahmen gehalten wird) und die Bewegungsbahn als angenehm bis akzeptabel empfindet, solange ein ausreichender Abstand zum Robotersystem besteht. Die Daten der Befragung bestätigen das Ergebnis. Die Probanden geben an, dass der Faktor Distanz der einflussreichste auf ihre Wahrnehmung ist. Bei der Frage, ob Informationen zum zukünftigen Verhalten des Roboters sinnvoll wären, antworteten die Probanden überwiegend positiv. Der Bedarf einer Schnittstelle wird damit hervorgehoben. Da die Teilnehmer vor dem Versuch keine Kenntnis von Aufbau oder Ablauf hatten, ist die Einschätzung gegenüber der Distanz nachvollziehbar. Kritisch zu hinterfragen ist, dass entgegen der Aussage anderer Studien die restlichen Faktoren als weniger einflussreich betrachtet werden. Vermutlich ist dies zum einen auf den experimentellen Aufbau und zum anderen auf die Rolle der Probanden zurückzuführen. Die Geschwindigkeit ist an die normativen Richtlinien angepasst und dadurch geringer als in anderen Studien. Die zudem geringere Distanz im Versuch beeinflusst das Ergebnis in diese Richtung (vgl. Arai et al., 2010). Bei Fischer et al. (2014) hat der Proband eine aktive Rolle und ist dem System nicht passiv „ausgeliefert“, wodurch er die Distanz im Gegensatz zum vorliegenden Versuch beeinflussen kann. Die Evaluation der Wahrnehmung mit Informationsmodulen zeigt, dass die Module keine eindeutige Veränderung in der Wahrnehmung anderer Faktoren hervorrufen. Text- und Positionsanzeige durch den Beamer bewirken, ähnlich wie das einfache Tonsignal, keine Veränderung. Der Effekt der Sprachmitteilung und der Leuchtringe

wird im Vergleich dazu am einflussreichsten bewertet. Bei der Frage, ob die wahrgenommene Veränderung als angenehmer oder unangenehmer empfunden wird, ergibt sich mit Ausnahme des Tonsignals ein deutliches Votum für einen angenehmen Effekt. Das einfache Tonsignal wird mit 53% als unangenehmer wahrgenommen. In diesem Zusammenhang geben die Probanden an, dass ein andauerndes Tonsignal bei jeder Bewegung des Roboters störend ist. Die Befragung zur Einschätzung der Gestaltung der Informationsmodule ergibt, dass die Probanden einfache, visuelle Systeme präferieren. Die Bewertung deckt sich mit den Erwartungen aus der Expertenbefragung. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Untersuchung auf die unspezifische Informationsübermittlung an einen passiven Partner beschränkt ist. Komplexere Systeme, die in diesem Zusammenhang als ungeeignet erachtet werden, können im Falle einer Kollaboration, in der prozessspezifische Informationen übermittelt werden, einen deutlichen Vorteil bieten. Dies gilt es, in einem Anwendungsbeispiel zu überprüfen. Die Meinung der Experten, eine intuitive Informationsübermittlung des Roboterzustands über einfache und schnell zu verstehende Signale zu realisieren, kann für den Menschen in der Rolle des Beobachters klar bestätigt werden. Diese Annahme wird mit dem Ergebnis für das Modul der Leuchtringe eindeutig wiedergespiegelt. Es ist festzuhalten, dass die Probanden die Informationsmodule, sofern sie eine Veränderung der Wahrnehmung bewirken, als positive Verbesserung empfinden. Diese bietet ihnen ein besseres Verständnis des Roboters und erhöht die empfundene Sicherheit. Dabei wird eine einfache und visuelle Gestaltung der Informationsbereitstellung präferiert. Die Beeinflussung der Wahrnehmung anderer Einflussfaktoren durch den Einsatz der Informationsmodule kann nicht nachgewiesen werden. Da im Experiment die Informationsübermittlung über den Zustand des Roboters an einen Menschen in einer passiven Rolle untersucht wird, gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse mit den von Menschen in einer aktiven Rolle zu vergleichen. Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen Studien (Arai et al., 2010; Fischer et al., 2014), indem sie die Relevanz eines Informationssystems (das über eine Aktion des Robo-

ters informiert) als Faktor für eine angenehmere Wahrnehmung bekräftigen. Andere Einflussfaktoren bleiben von diesem unabhängig. Abschließend ist zu erwähnen, dass die Ergebnisse es nicht ermöglichen, eine Aussage über den Effekt der Informationsmodule auf die Zusammenarbeit des Menschen mit dem Roboter zu treffen. Ein negativer Einfluss anhand der Menge an bereitgestellten Informationen kann (mit Ausnahme des einfachen Tonsignals) ausgeschlossen werden. Die zu Beginn des Kapitels definierte technische Gebrauchstauglichkeit lässt sich anhand der Ergebnisse jedoch nur für das Konzept der Leuchtringe bestätigen. Neben der Abhängigkeit der Ergebnisse vom experimentellen Aufbau, schränkt die rein subjektive Datenerhebung mittels selbstgeneriertem Fragebogen die Aussagekraft der Ergebnisse ein. Grund hierfür ist, dass die fragebogenbasierte Auswertung Vorurteilen ausgesetzt sein kann und diese nicht über eine objektive Datenerhebung mit bspw. physiologischen Kennwerten bestätigt wird (vgl. Kulic & Croft, 2006). Hierzu kann die Analyse von Herzfrequenz oder Hautleitfähigkeit und/oder des Verhaltens sowie Eye-Tracking herangezogen werden, was aufgrund des messtechnischen Umfangs im Rahmen des Experiments jedoch nicht möglich war. Die Verwendung standardisierter Fragebögen wie zum Beispiel *AttrakDiff* (Hassenzahl, Burmeister & Koller, 2008) oder *BEHAVE-II* (Joosse et al., 2013), die über ihre vielfache Anwendung eine höhere Aussagekraft besitzen, erfolgte nicht, da sie im Rahmen des experimentellen Aufbaus nicht passend erschienen.

### 5.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beinhaltet die experimentellen Untersuchungen zur technischen Gebrauchstauglichkeit der konzipierten Steuer- und Informationsmodule. Die durchgeführten Experimente verfolgen die Zielsetzung, eine negative Beeinflussung der Interaktion aufgrund von technischen Fehlern auszuschließen und subjektive Daten bzgl. Wahrnehmung und Nutzen der Schnittstellenkonzepte zu erlangen.

In den Versuchen werden die verschiedenen Teilaspekte der Schnittstellenkonzepte betrachtet. Die erste Untersuchung fokussiert die Gebrauchstauglichkeit der entwickelten Gesten- und Sprachsteuerung. Um einen Referenzwert bzgl. der Reaktionszeit zu erhalten, wird diese über einen Vorversuch mittels der Buzzersteuerung ermittelt. Im Anschluss folgen die Versuche zu Gesten- und Sprachsteuerung, in den die Anforderungen an Reaktionszeit und Zuverlässigkeit von beiden Konzepten zur Zufriedenheit der Probanden erreicht werden. Die Gebrauchstauglichkeit für eine nachfolgende Evaluation der Steuerungskonzepte ist damit aus technischer Sicht gegeben. Der Effekt der Informationsmodule auf die Wahrnehmung des Menschen wird auf Basis von vorab identifizierten Einflussfaktoren validiert, woraus hervorgeht, dass die Module nur einen geringen Effekt auf die Wahrnehmung haben. Diese rufen aber, sofern sie wahrgenommen werden, einen positiven Einfluss auf den Menschen hervor. Des Weiteren erzeugen sie bei den Probanden ein besseres Verständnis des Roboters sowie ein höheres Sicherheitsgefühl. Präferiert werden Systeme mit einfacher, visueller Informationsübermittlung. Komplexere Systeme werden im Kontext dieser Untersuchung als nicht geeignet betrachtet.

Die Ergebnisse spiegeln das subjektive Empfinden der Probanden im Rahmen der Nutzung der Systeme wieder. Objektive Daten werden nur im Experiment zur Funktionalität der entwickelten Steuermodule erhoben.

## 6 Experimentelle Evaluation der Prozessinteraktionssystematik

In diesem Kapitel werden zwei Experimente beschrieben, die anhand eines adaptierten Montagearbeitsplatzes den Einfluss unterschiedlicher Montagekonzepte und Robotersteuerungen in Kombination mit den Informationsmodulen auf die Prozesszeit und die Ergonomie untersuchen. Ziel ist es, mittels der Versuche die Annahmen der PIS zu verifizieren und Empfehlungen für die Gestaltung der Schnittstelle zu generieren. Es werden keine Änderungen am Funktionskonzept der Schnittstellen vorgenommen. Der Aufbau und Prozessablauf des ausgewählten Montageprozesses wird an eine MRI-gerechte Gestaltung angepasst. Die Experimente unterscheiden sich bei fast identischen Aufbau in ihrem Fokus. Der erste Versuch analysiert den Einfluss der Prozessgestaltung, der zweite den der Steuerschnittstellen.

### 6.1 Beschreibung des Anwendungsszenarios

Die Wahl des Anwendungsfalls orientiert sich an der Verortung der MRI-Szenarien, die in der Potentialanalyse erarbeitet wurde (vgl. Kap. 3). Die manuelle Vormontage von Abgasturboladern ist ein Anwendungsfall, der sich im Bereich der Vormontage des Motorenbaus befindet und Potentiale für einen kollaborativen Prozess im Sinne des Interaktionsszenarios bietet. In dieser Station werden verschiedene Varianten von Abgasturboladern (ATL) für V-Motoren montiert, die im Nachgang an die Zylinderbänke der Motoren gefügt werden. Die Vormontage des ATLs umfasst die Verschraubung einer Ölrücklaufleitung (ÖRL) und zweier Kühlmittleitungen (KML). Zudem werden der QR-Code am ATL sowie die Dichtung der ÖRL geprüft. Abbildung Abb. 6.1 visualisiert den Ablauf des Montageprozesses und zeigt die einzelnen Bauteile. Für die Vormontage wird der ATL aus einem Bereitstellungsbereich geholt und in der Montagestation platziert, anschließend holt der Werker die variantenspezifische ÖRL sowie die zwei





KML während der Montage. Damit gehen Such- und Wegzeiten einher, die durch die hohe Variantenvielfalt an ATL-Modellen sowie deren spezifische Anbauteile bedingt sind. Zudem bestehen ergonomische Potentiale für die manuelle Handhabung. Da ein ATL je Modell zwischen sechs bis acht Kilogramm wiegt, wird der Werker durch das Heben, Tragen, Abstellen und Ausrichten des ATLs beansprucht.

Mit Teilebereitstellung, Teilehandling, Schraubprozessen und Prüfumfängen können vier Teilprozesse für einen potentiellen Robotereinsatz identifiziert werden. Die genauere Betrachtung der Schraubprozesse zeigt, dass die Übertragung auf den Roboter kritisch ist, da bei der Montage ausschließlich Innen-Torx-Schrauben eingesetzt werden. Ein Roboterarm, der ein Schraubwerkzeug mit Torxkopf kleinerer Größe trägt, stellt bei einer Kollision aufgrund der punktuellen Krafteinwirkung ein hohes Gefahrenpotential dar. Da Mensch und Roboter im Rahmen der direkten Interaktion eng miteinander arbeiten, wird dieser Ansatz aus Sicherheitsaspekten nicht weiter verfolgt. Die anderen Prozessschritte zeigen keine derartigen Risiken auf, womit drei Ansätze für die Integration des Roboters in den Montageprozess verbleiben. Teilebereitstellung und Prüfumfänge bieten Potentiale zur Parallelisierung und dadurch eine Einsparung von Planzeit. Weiter besteht die Möglichkeit einen ergonomisch verbesserten Prozessablauf zu realisieren, womit beide Hauptpotentiale (Wirtschaftlichkeit und Ergonomie) abgebildet werden können. Es ist davon auszugehen, dass der Effekt des Robotereinsatzes je nach gewähltem Ansatz variiert. Im Folgenden werden drei Konzepte zur Umsetzung der MRI, deren Potentiale sowie ein Referenzkonzept vorgestellt. Letzteres ist für den Vergleich zwischen manuellem Prozess und den MRI-Varianten notwendig. Abbildung Abb. 6.3 zeigt die Gesamtübersicht der einzelnen Konzepte mittels einer idealisierten Abfolge der einzelnen Prozessschritte sowie deren Aufteilung zwischen Mensch und Roboter.

### ***Referenzkonzept K0***

Das Referenzkonzept (*K0*) stellt den, auf den experimentellen Aufbau angepassten, manuellen Montageprozess des Turboladers dar (vgl. Abb. 6.3). Der Werker (Proband) montiert den ATL am Montagearbeitsplatz und holt sich die Montageteile eigenständig aus dem Bereitstellungsbereich.

### ***Handlingskonzept K1***

Das Handlingskonzept (*K1*) basiert auf der Integration des Roboters in Form eines intelligenten Montageassistenten. Der Roboter übernimmt die Handhabung des ATLs im gemeinsamen Arbeitsraum und positioniert diesen je nach Montageschritt in einer für den Menschen optimalen Position (vgl. *K1* in Abb. 6.3). Hierfür wird eine Fixiervorrichtung am Flansch des Roboters montiert. Die Prozessanteile des Menschen sind Teilebereitstellung sowie alle Montagevorgänge. Über die Aufteilung können Handhabung des ATLs während der Montage sowie Prüfvorgänge parallelisiert werden. Neben der verbesserten Ergonomie (durch eine aufrechte Haltung des Menschen bei der Montage) ist in *K1* eine Effizienzsteigerung durch die Parallelisierung sowie eine reduzierte Fehleranfälligkeit zu erwarten.

### ***Logistikkonzept K2***

Das Logistikkonzept (*K2*) dient der Untersuchung einer automatisierten Teilebereitstellung. Der Fokus liegt auf der Übernahme aller Bereitstellungsaufgaben durch den Roboter, um die den Menschen durch die Vermeidung des Tragens schwerer Lasten und die Reduzierung der Laufwege zu entlasten. Der Montagevorgang entspricht dem in *K0*, weshalb während der Montage keine Verbesserung der Ergonomie erwartet wird. Im Logistikkonzept werden zwei Roboter in den Aufbau integriert, einer übernimmt die Aufgabe eines flexiblen Stativs, an das die Kamera für die Prüfvorgänge befestigt wird. Der andere wird auf einer Linearachse montiert und dient der Teilebereitstellung. Die Aufteilung erlaubt es, alle Bereitstellungsprozesse und Prüfvorgänge zu parallelisieren. Daraus ergeben sich Potentiale

zur Effizienzsteigerung und zur Reduzierung der Fehleranfälligkeit. Eine potentielle Verbesserung der Ergonomie während der Montage entfällt.

### Kombikonzept K3

Das Kombikonzept (*K3*) kombiniert die intelligente Montageassistentz mit der automatisierten Teilebereitstellung der Konzepte *K1* und *K2*. Dabei übernimmt der Roboter sowohl die Teilebereitstellung, als auch das Handling des ATLS. Hierfür wird ein Roboter (R1) für das Handling herangezogen, der andere (R2) übernimmt mittels der Linearachse die Bereitstellung. Der Anteil des Menschen beschränkt sich ausschließlich auf die wertschöpfenden Montagetätigkeiten (vgl. *K3* in Abb. 6.3). Durch die Kombination der Konzepte *K1* und *K2* sind eine Steigerung der Effizienz, sowie ergonomische Verbesserungen zu erwarten. Da alle möglichen Potentiale zur Automatisierung genutzt werden, sinkt jedoch die Flexibilität des Gesamtprozesses.

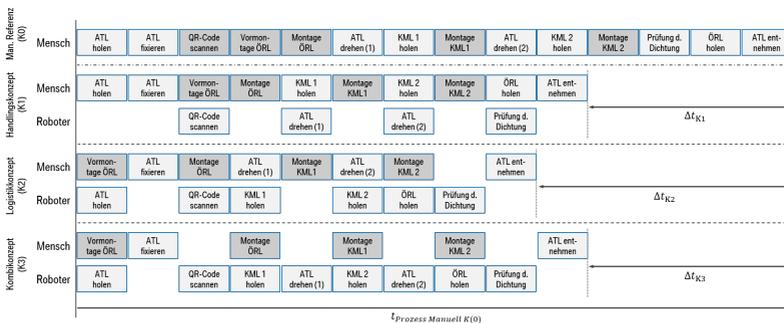


Abb. 6.3: Abfolge der einzelnen Prozessschritte der Montage des Abgasturboladers in Abhängigkeit der definierten Konzepte (dunkelgrau sind Primär-, hellgrau Sekundärvorgänge dargestellt).

Die vergleichende Darstellung der Konzepte in Abbildung Abb. 6.3 zeigt die Prozessanteile von Mensch und Roboter sowie deren Montageabfolge. Eine quantitative Abschätzung der Zeitanteile ist auf Basis der idealisierten Darstellung nicht möglich. Um eine belastbare Vorhersage über Zeitanteile sowie Potentiale der Konzepte zu treffen, werden die Montagekonzepte mittels der MTM Methodik bewertet (vgl. Kap. 2.1.2). Hierfür wird die *MTM-1-Methode* angewandt. Andere Verfahren wie das *MTM-Universelles-Analysier-System* (MTM-UAS), die mit Grundvorgängen arbeiten, ermöglichen es nicht, den gewünschten Grad an Detaillierung zu generieren. Dieser wird benötigt, um die durch den Robotereinsatz modifizierten Prozessschritte anhand der Grundbewegungen exakt zu beschreiben und detaillierte Angaben zu Zeitanteilen machen zu können. Die MTM-1-Kodierung der einzelnen Prozessschritte und deren TMU Zuordnung ist am Beispiel des Referenzkonzepts *K0* durchgeführt und im Anhang in Abschnitt A.3 dargestellt. Dabei wird in der Kodierung zwischen linkem und rechtem Arm sowie nach Art der Robotersteuerung differenziert. Bei parallelen Tätigkeiten geht die längere in die Bewertung ein. Für Buzzer- sowie Gestensteuerung fallen TMU-Werte an, da diese nicht parallel zum Montageprozess erfolgen können. Im Gegensatz dazu ergeben sich durch die Abgabe von Anweisungen per Sprache in der Theorie keine zusätzlichen Zeitaufwände. Dies beruht auf der Annahme, dass der Werker den Roboter parallel zum Prozessgeschehen steuert und keine Hand für die Gestensteuerung oder die Betätigung des Buzzers benötigt. Zudem müssen Werkzeuge oder Montageteile nicht zur Befehlsabgabe abgelegt werden. Einen exemplarischen Einblick in die Kodierung und einen Vergleich zwischen den Konzepten *K0* bis *K3* gibt Abschnitt A.3 im Anhang. In den Konzepten werden die Arbeitsanteile von Mensch und Roboter ihrer MTM-Kodierung entsprechend unterschieden. Für die Bewegung des Roboters wird keine spezifische Kodierung vorgenommen, als Differenzzeit wird die Dauer der Tätigkeiten herangezogen, die der Mensch nicht mehr durchführt.

Die Summe der TMUs ergibt die Gesamtprozesszeit und bietet eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den Konzepten. Für *K0* ergibt sich eine Gesamtdauer von 125.8 Sekunden (= 3493.5 TMU). Diese verringert sich in Abhängigkeit von Konzept und Robotersteuerung um max. 33.9% bis auf 83.1 Sekunden (= 2306.9 TMU) bei *K3* in Verbindung mit der Sprachsteuerung. Tabelle 6.1 zeigt die über die MTM-Analyse ermittelten Planzeiten in Abhängigkeit von Konzept und Robotersteuerung. Der Vergleich von *K0* mit *K1* zeigt eine durchschnittliche Planzeiteinsparung von 13.7%. Diese ist auf die Reduzierung von Beuge- und Aufrichtvorgängen sowie der Vereinfachung von Schraub- und Fügevorgängen zurückzuführen. Wird *K2* mit *K1* verglichen, zeigt sich der Mehrwert der logistischen Unterstützung durch die Teilebereitstellung. Bei sonst gleicher Ausführung wie in Konzept *K0*, reduziert diese, bis auf bei der Entnahme des ATLS, alle Geh- und Drehaufwände im Prozess. Dies ermöglicht eine zeitliche Einsparung von durchschnittlich 16.6%. Die Einsparpotentiale der Konzepte *K1* und *K2* kombinieren sich in *K3* und ergeben die höchste zeitliche Einsparung. In der Theorie kann *K3* bezogen auf die Prozesszeit als das „Beste“ der drei Konzepte bezeichnet werden.

Tab. 6.1: Mittels MTM-1-Methode bestimmte Planzeit [s] der Montagekonzepte in Abhängigkeit der Robotersteuerung

<b><i>K0</i></b>	<b><i>K1<sub>B</sub></i></b>	<b><i>K1<sub>G</sub></i></b>	<b><i>K1<sub>S</sub></i></b>	<b><i>K2<sub>B</sub></i></b>	<b><i>K2<sub>G</sub></i></b>	<b><i>K2<sub>S</sub></i></b>	<b><i>K3<sub>B</sub></i></b>	<b><i>K3<sub>G</sub></i></b>	<b><i>K3<sub>S</sub></i></b>
125.8	108.7	112.1	105.4	105.1	109.0	100.9	86.4	89.8	83.1

*Anmerkung.* Aufgeführt sind Handlingskonzept (*K1*), Logistikkonzept (*K2*) und Kombikonzept (*K3*) sowie die Robotersteuerungen per Buzzer (B), Geste (G) und Sprache (S).

Anhand der in der MTM-Analyse festgelegten Zeitanteile können die Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik vorbestimmt werden, die als Gradmesser für die Interaktionseffizienz dienen (vgl. Kap. 4.2). Die Werte werden unter den folgenden Annahmen in der Prozessplanung bestimmt. Erstens, die AZM entspricht der Gesamtprozesszeit. Dementsprechend ist die IZM

gleich null, da theoretisch keine Wartezeiten im Prozess entstehen. Zweitens findet der Anteil der AZR parallel zur AZM statt, womit GZAs mit der AZR gleichzusetzen sind. Die Werte in Tabelle 6.2 zeigen für  $K1$  die höchsten Anteile der IZR und bei  $K3$  die geringsten. Entsprechend invers verhalten sich die aktiven Zeiten der Prozesspartner. Die Werte des MRPE sind für alle Konzeptvarianten positiv, wenn auch  $K1$  nur ganz gering über Null steht. Bedingt ist dieser Wert durch den maximalen menschlichen Prozessanteil, der sich aus der Planung ergibt. Kritisch sind die geringen Werte für den Roboter-Prozessanteil, die besagen, dass der/die Roboter einen Großteil der Zeit ungenutzt sind. Der aufgestellte Kennwert ( $MPE > RPE$ ) ist prinzipiell erfüllt. Der Kollaborationsgrad  $\varphi_k$  korreliert mit dem Anteil des Roboters am Prozess und steigt von einem sehr geringen Wert bei  $K1$  auf 0.27 für  $K3$ . Wie in der Prozessgesamtzeit, zeigt  $K3$  die Kennwerte mit der höchsten MRPE, dem höchsten Kollaborationsgrad sowie der kleinsten RPE. Eine quantitative Angabe zur Kollaborationseffizienz und der damit einhergehenden PIE ist in der theoretischen Vorbewertung nicht möglich. Diese hängt von der jeweiligen Person und der gewählten Steuerungsform ab.

Tab. 6.2: Theoretische Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte

	$K1_B$	$K1_G$	$K1_S$	$K2_B$	$K2_G$	$K2_S$	$K3_B$	$K3_G$	$K3_S$
<b>AZM</b>	108.7	112.1	105.4	105.1	109.0	100.9	86.4	89.8	83.1
<b>IZM</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>AZR</b>	9.4	9.4	9.4	24.8	24.8	24.8	31.4	31.4	31.4
<b>IZR</b>	99.4	102.7	96.1	80.2	84.2	76.0	55.0	58.3	51.7
<b>MRPE</b>	0.09	0.08	0.09	0.24	0.23	0.25	0.24	0.23	0.38
$\varphi_k$	0.08	0.08	0.08	0.19	0.19	0.20	0.27	0.26	0.27

*Anmerkung.* Aufgeführt sind Handlingskonzept ( $K1$ ), Logistikkonzept ( $K2$ ) und Kombikonzept ( $K3$ ) mit Robotersteuerung per Buzzer (B) oder Geste (G), sowie Aktive Zeit des Menschen (AZM), Inaktive Zeit des Menschen (IZM), Aktive Zeit des Roboters (AZR), Inaktive Zeit des Roboters (IZR), Mensch-Roboter-Prozesseffizienz (MRPE) und Kollaborationsgrad ( $\varphi_k$ ).

Aufgrund der theoretisch ermittelten Werte liegt  $K3$  vor  $K2$  und  $K1$ . Die Werte differenzieren sich je nach Schnittstelle, behalten diese Reihenfolge aber bei. Der Effekt der Kollaborationsgestaltung auf die Wahrnehmung des Menschen ist nicht zu bestimmen. Die Kenngrößen der PIS lassen  $K3$  mit der Steuerung per Buzzer oder Sprache jedoch als das subjektiv optimale Konzept ableiten. In wie weit die theoretischen Werte den realen gleichen, ist zu untersuchen.

### 6.2.2 Zielsetzung

Ziel des Experiments ist, zum einen die anhand der entwickelten Interaktionssystematik aufgestellten Gestaltungsempfehlungen für einen kollaborativen Prozess zu verifizieren. Dies beinhaltet vor allem die Bestätigung der Fähigkeit des Modells, die Interaktion im Prozess auf Basis der objektiven Daten so zu beschreiben, dass die Aussagekraft der Kennzahlen auch durch die subjektive Wahrnehmung wiedergespiegelt wird. Zum anderen sollen die Erwartungen aus den theoretischen Vorüberlegungen durch die entworfenen Konzepte bestätigt werden. Dies schließt neben der erwarteten Zeitersparnis auch eine Verbesserung der Ergonomie mit ein.

Die quantitativen Zielgrößen des Versuchs stellen Prozesszeit und Körperhaltung des Werkers bzw. des Probanden dar. Dabei ist die Prozesszeit im Experiment als die Zeit definiert, die der Proband ab dem Start der Montage bis zur Entnahme des ATLs benötigt. Über diese kann ein Vergleich zur ermittelten Planzeit sowie eine Abschätzung zur Wirtschaftlichkeit getroffen werden. Grundlage für Letzteres bilden die im vorherigen Abschnitt theoretisch ermittelten Werte der MTM-1-Analyse. Des Weiteren dient die Erhebung der einzelnen prozessualen Zeitanteile anhand der Prozessinteraktionssystematik der Analyse der Prozessgestaltung und somit der Untersuchung des Effektes von inaktiven Zeiten auf das subjektive Prozessempfinden. Die Messung der quantitativen Daten zur Bewertung der physischen Beanspruchung erfolgt über Beobachtung der Körperhaltung

während des Montageprozesses. Die psychische Beanspruchung wird qualitativ über einen Fragebogen ermittelt. Jener erfasst neben diesen Aussagen Daten zu Prozessgestaltung und Kollaboration und dient der Erhebung von subjektiven Daten, die den gemessenen Größen gegenübergestellt werden.

Die im Rahmen des Experiments auf die Zielgrößen wirkenden Faktoren stellen das Montagekonzept (Art und Anteil der durch den Roboter durchgeführten Tätigkeiten), die Robotersteuerung sowie die Interaktionsmodule dar. Die unabhängigen Variablen lassen sich bzgl. ihres Einflusses auf die Zielgrößen in primäre (Montagekonzept und Robotersteuerung) und sekundäre Faktoren (Interaktionsmodule) einteilen. Letztere besitzen, wie in Kap. 5 gezeigt, einen „subjektiv-positiven“ Einfluss auf die Interaktion zwischen Mensch und Roboter. Es ist zu klären, ob und in welchem Maße diese den Montageprozess beeinflussen. Auf Basis der durchgeführten Voruntersuchungen ist zu evaluieren, ob die Informationsmodule sich für den Einsatz in einem Montageszenario empfehlen und ob sich die Erwartungen gegenüber einer verbesserten Zusammenarbeit durch deren Integration bestätigen. Von den sechs in Kap. 5 getesteten Modulen werden drei (Lautsprecher, Beamer und Leuchtringe) für das Experiment ausgewählt. Die Wahl fällt auf diese Module, da sie es ermöglichen, die in den Voruntersuchungen präferierten visuell und auditiv einfachen Informationen an die Probanden zu übermitteln. Der Bildschirm wird als Referenz genutzt, da diese Art der Informationsbereitstellung im Werk verwendet wird. Eine Übersicht über die Variablen und deren Faktorstufen wird in Tabelle 6.3 gegeben. Weitere Faktoren, wie beispielsweise verschiedene ATL-Varianten, werden im Rahmen des Experiments nicht betrachtet.

Tab. 6.3: *Unabhängige Variablen und Faktorstufen zur Untersuchung der Prozessinteraktionssystematik*

Montagekonzept	Robotersteuerung	Informationsmodule
<i>K0</i>	Buzzer	Bildschirm
<i>K1</i>	Geste	Lautsprecher
<i>K2</i>	Sprache	Beamer
<i>K3</i>		Leuchtringe

Die Abstufungen des Faktors Montagekonzept entsprechen den in Abschnitt 6.2.1 definierten Konzepten. Aufgrund der unterschiedlichen Gestaltung ist zu erwarten, dass sich die mittels MTM-Analyse und PIS hergeleitete Differenz bzgl. der Zielgröße Prozesszeit auch in der Realität abbildet. Zur Steuerung des Roboters stehen die drei in Kap. 4 entwickelten Systeme zur Verfügung. Es ist zu klären, in wie weit sich die unterschiedlichen Steuerungen auf die Zielgrößen auswirken und im Besonderen welchen Einfluss die Bedienung der natürlichen Steuerungskonzepte auf die Kollaborationseffizienz sowie die Produktivität des Arbeitssystems haben.

## **6.3 Evaluation der Prozessgestaltung**

In der folgenden experimentellen Untersuchung werden die Effekte der entwickelten Montagekonzepte sowie die der Robotersteuerung auf die Zielgrößen Prozesszeit und Ergonomie anhand eines realen Montageszenarios evaluiert. Die Zielsetzung besteht darin, die erwarteten Zusammenhänge sowie die theoretisch postulierten Annahmen der PIS experimentell zu bestätigen. Der Fokus der Evaluation liegt auf der Prozessgestaltung, weshalb der Faktor Montagekonzept im Vordergrund des Versuchsdesigns steht. Neben diesem werden der Interaktionsfluss und die qualitative Zielgröße Wahrnehmung der Interaktionsmodule betrachtet. Als Referenz dient die adaptierte manuelle Montage ohne Roboterunterstützung. Das Kapitel beginnt mit der Erläuterung der Vorgehensweise des Experiments, darauf folgt die Präsentation und abschließend die Diskussion der Ergebnisse.

### **6.3.1 Methodik**

Dieser Abschnitt legt die angewandte Vorgehensweise der Untersuchung in drei Teilen dar. Das experimentelle Design wird im Abschnitt Versuchsplanung erläutert und die verwendeten Materialien im Versuchsaufbau. Der letzte Abschnitt, der die Durchführung beschreibt, schließt das Kapitel ab.

#### **6.3.1.1 Versuchsplanung**

Im Rahmen der theoretischen Vorüberlegungen werden drei Einflussfaktoren mit drei bzw. vier Abstufungen definiert. Diese Anzahl an Ausprägungen erfordert für einen vollfaktoriellen Versuchsplan 36 Durchläufe pro Proband. Da diese Anzahl zeitlich sowie konzentrationsmäßig von einer Person nicht darstellbar ist, wird diese reduziert, damit die Untersuchung in einem für die Probanden akzeptablen Zeitrahmen von ca. 2.5 bis 3 Stunden realisiert werden kann. Diese Untersuchung fokussiert den Einfluss der Montagekonzepte auf die Zielgrößen Prozesszeit und Ergonomie, weshalb die restlichen

Faktoren angepasst werden. Der Einflussfaktor Robotersteuerung wird um eine Ausprägung von drei auf zwei reduziert. Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchung in Kapitel 5 wird die Sprachsteuerung nicht berücksichtigt und im Nachgang evaluiert (vgl. Kap. 6.4). Die Steuerungskonzepte Buzzer und Geste liegen in dieser initialen Bewertung auf dem ersten und dem dritten Rang, weshalb eine klare Unterscheidung der Konzepte hinsichtlich ihrer Auswirkung als wahrscheinlich erscheint. Der Faktor Informationsmodule wird von vier auf zwei Ausprägungen reduziert und abgewandelt. Eine Ausprägung repräsentiert das klassische Informationssystem des Bildschirms, die andere die Präsenz aller Module. Für die Einflussfaktoren Montagekonzept sowie Robotersteuerung wird ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt, der (ohne Beachtung von *K0*) eine Anzahl von sechs bzw. sieben (inkl. *K0*) Durchläufen ergibt. Die Variierung der Ausprägungen des Faktors Informationsmodul wird auf die Hälfte der Versuche mit Beteiligung des Roboters beschränkt. Durchgeführte Vorversuche zeigen, dass das Experiment mit entsprechender Einführung und Betreuung des Probanden ca. 2.5 Stunden in Anspruch nimmt. Um eine Verfälschung der Ergebnisse durch den Übungseffekt zu vermeiden, wird die Reihenfolge der MRI-Konzepte variiert. *K0* wird als Referenz jeweils zu Beginn und am Ende des Versuchs durchgeführt. In wie weit diese Positionierung die Zeiten beeinflusst, gilt es bei der Analyse der Ergebnisse zu untersuchen. Der Versuchsplan des Experiments ist in Tabelle 6.4 dargestellt. *K0* ist in dieser Übersicht nicht enthalten, da es als manuelle Referenz keine Variation der Einflussfaktoren beinhaltet.

Tab. 6.4: *Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Faktoren Montagekonzept, Robotersteuerung und Informationsmodul auf die Zielgrößen Prozesszeit und Ergonomie*

Montagekonzepte	Interaktionsmodule		Anz. Probanden
	an	aus	
K1	Buzzer / Geste	Buzzer / Geste	24
K2	Buzzer / Geste	Buzzer / Geste	24
K3	Buzzer / Geste	Buzzer / Geste	24

### 6.3.1.2 Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt werden der experimentelle Aufbau und dessen einzelne Elemente samt Funktion und Zuordnung zum jeweiligen Konzept beschrieben. Die Robotersteuerung und die relevanten Messwerkzeuge, die zur Datenerhebung verwendet werden, werden vorgestellt. Der Abschnitt schließt mit der Erläuterung der Inhalte des Fragebogens für die subjektive Datenerhebung.

#### Interaktionsarbeitsplatz

Der für das Experiment nachempfundene Montagearbeitsplatz, im folgenden Interaktionsarbeitsplatz (IAP) genannt, besitzt gegenüber der realen Anwendung im Werk verschiedene Einschränkungen und Erweiterungen, die für die Implementierung der MRI notwendig sind. Im Gegensatz zur Montage im Motorenbau, in der unterschiedliche ATLS vormontiert werden, beschränkt sich der Versuch auf eine Variante. Dies ist zum einen durch den höheren, nicht darstellbaren Platzbedarf, als auch durch die Reduzierung der Einflussfaktoren bedingt (vgl. Kap. 6.3.1.1). Der benötigte Lagerbereich fällt dementsprechend kleiner aus und ist in der Laborumgebung realisierbar. Abbildung Abb. 6.4 zeigt einen schematischen Überblick des IAP aus der Draufsicht.

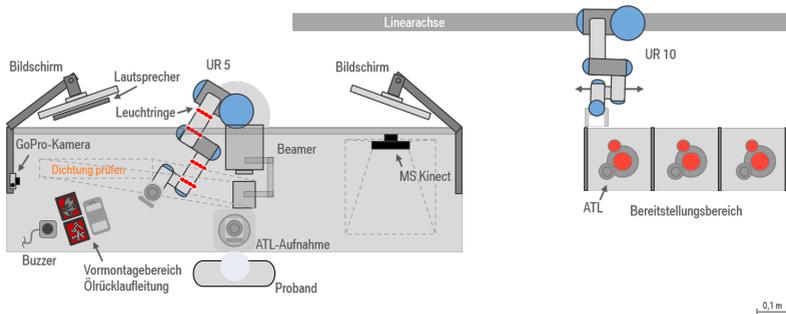
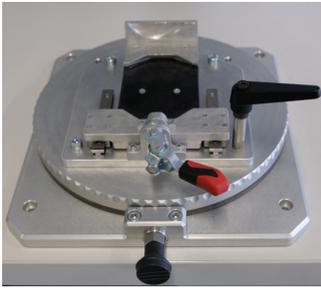


Abb. 6.4: Experimentalaufbau des Interaktionsarbeitsplatzes.

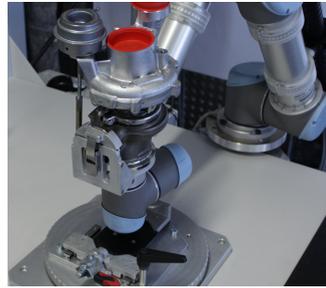
In den Versuchsaufbau werden zwei Roboter integriert. Für die Unterstützung der Montage wird ein Roboter des Typs UR5, für die Teilebereitstellung ein UR10 verwendet. Der Montagebereich der manuellen Montage des ATL (*K0* und *K2*) am IAP ist dem des Werks nachempfunden. Der ATL wird aus dem Bereitstellungsbereich entnommen und für die Montage in der ATL-Drehtelleraufnahme fixiert, die auf dem Tisch befestigt ist. Die durch den Roboter unterstützte Montage (*K1* und *K3*) wird über eine ATL-Fixierung auf dem Roboterflansch des UR5 Roboters realisiert. Beide ATL-Aufnahmen sind in Abbildung Abb. 6.5 dargestellt.

Der Drehteller in Abbildung Abb. 6.5 (a) wird über Ziehen des Knaufs (an der Vorderseite) gelöst und arretiert sich nach einer Drehung von 90 Grad wieder von selbst. In der Aufnahme am Roboterflansch wird der ATL über einen Spannhebel arretiert. Die Steuerung des Roboters erfolgt je nach Vorgabe über den Buzzer oder per Geste. Der Buzzer ist am IAP auf der linken Tischseite angebracht, der Raum zur Darstellung der Gesten befindet sich auf der rechten Seite unterhalb der Microsoft *Kinect* Kamera (vgl. Abb. 6.4). Im Hintergrund des Darstellungsraums ist ein Bildschirm fixiert, über den die Rückmeldung der Gestensteuerung an den Probanden erfolgt. Neben dem Buzzer befindet sich die Vormontagevorrichtung für die ÖRL. In den roten Bereitstellungsbehältern werden Schrauben und die entsprechenden Dichtungen vorgehalten.

Der Leichtbauroboter UR5 ist an der hinteren Tischkante montiert und fährt auf einer fest definierten Montagehöhe. Die für die Montage notwendigen Akku-Schrauber (in Abb. 6.4 nicht abgebildet) werden im rechten Bereich des Tisches, unterhalb der *Kinect* Kamera, bereitgestellt. In den Konzepten *K2* und *K3* findet in diesem Bereich die Bereitstellung des ATLs sowie der Anbauteile statt. Der verwendete UR10 Roboter ist auf der Zahnriemenachse des Typs *EGC-TBKF* von Festo fixiert (max. Verfahrensweg 3.3 m) und holt mit Hilfe eines Greifers den ATL sowie die in Kleinladungsträgern (KLT) befindlichen Teile aus dem Bereitstellungsbereich. Abbildung Abb. 6.6 (a) zeigt Roboter und Linearachse in der Position vor dem Bereitstellungslager.



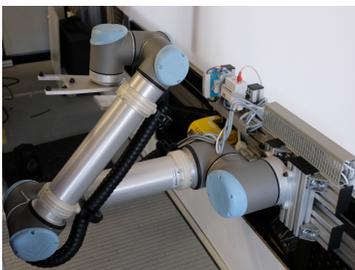
(a)



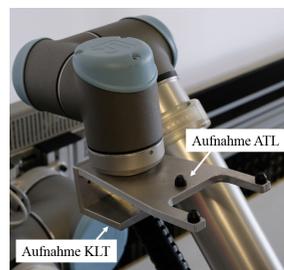
(b)

Abb. 6.5: Montagespannvorrichtungen am Interaktionsarbeitsplatz; (a) Drehtellerspannvorrichtung auf dem Tisch mit Zugknopf zur Arretierung; (b) Auf UR5 Roboterflansch montierte ATL-Spannvorrichtung für die roboterunterstützte Montage.

Der für den Transport von KLT und ATL entwickelte Greifer ist in Abbildung Abb. 6.6 (b) abgebildet. Die Aufnahme verschiedener ATL-Varianten erfolgt über die mit gummierten Kontaktpunkten versehene Gabel, die der KLTs über die U-förmige Aufnahmevorrichtung an der Unterseite des Greifers (vgl. Abb. 6.6 (b)), die den Griff an den KLTs nutzt, um diese zu transportieren. Um die Greiffunktion zu wechseln, wird die vierte Achse des Roboters um 90 Grad gedreht.



(a)



(b)

Abb. 6.6: Experimenteller Aufbau der Teilebereitstellung durch einen UR10 Roboter; (a) Fixierung des UR10 Roboters an der Linearachse, (b) Doppelfunktionsgreifer am Roboterflansch zur Aufnahme von Abgasturboladern und Kleinladungsträgern.

Das für die Bereitstellung durch Mensch und Roboter nutzbare Regal zeigt Abbildung Abb. 6.7. Dieses enthält im oberen Bereich die ATLS und in den unteren Fächern die KLTs. Die im Montageprozess durchzuführenden visuellen Prüfvorgänge des QR-Codes sowie der Dichtung werden über eine TCP/IP-Kamera realisiert, die in Konzept *K1 / K3* am Überbau und in *K0 / K2* stationär am Roboter befestigt ist. Als Bilderkennungssystem wird ein BMW internes System genutzt, das sowohl QR-Codes auslesen kann, als auch Qualitätsmerkmale mittels Bilderkennung überprüft. Die Informationsmodule sind am Überbau des IAP befestigt (vgl. Abb. 6.4). Der Beamer befindet sich zentral oberhalb des Arbeitsbereichs und projiziert Information zum aktuellen Prozessschritt auf die Arbeitsfläche. Dies ermöglicht es dem Probanden, während der Montage Information zu erhalten, ohne aufblicken zu müssen. Die im Werk angewandte Informationsbereitstellung erfolgt über einen Bildschirm, der auf der rechten Seite des Tisches montiert ist (vgl. Abb. 6.4).

Will der Proband diese als Informationsquelle nutzen, muss er seinen Blick, im Gegensatz zur Informationsbereitstellung durch den Beamer, vom Montageobjekt abwenden. Unterhalb des Bildschirms ist ein Lautsprecher montiert,



Abb. 6.7: Experimenteller Aufbau des mit Abgasturboladern und Kleinladungsträgern bestückten Bereitstellungsregals für Roboter und Mensch.

der den Probanden zu bestimmten Zeitpunkten des Prozesses auf den kommenden Prozessschritt hinweist. Der Proband wird u.a. informiert, sobald der Roboter die Prüfung des QR-Codes am ATL durchführt. Die Leuchtringe haben wie in Kap. 5 die Funktion, den Menschen den Zustand des Roboters zu visualisieren. Dabei wird der sich bewegende Roboter über ein rot-rotierendes Signal, der stillstehende über ein grün-pulsierendes Signal angezeigt. Das Warten auf eine Anweisung durch den Menschen zeigt der Roboter über ein blau-rotierendes Signal an. Die Kommunikationsstruktur des IAP zeigt Abbildung Abb. 6.8. Der Datenaustausch basiert auf Digital Input/Output sowie dem Modbus Protokoll.

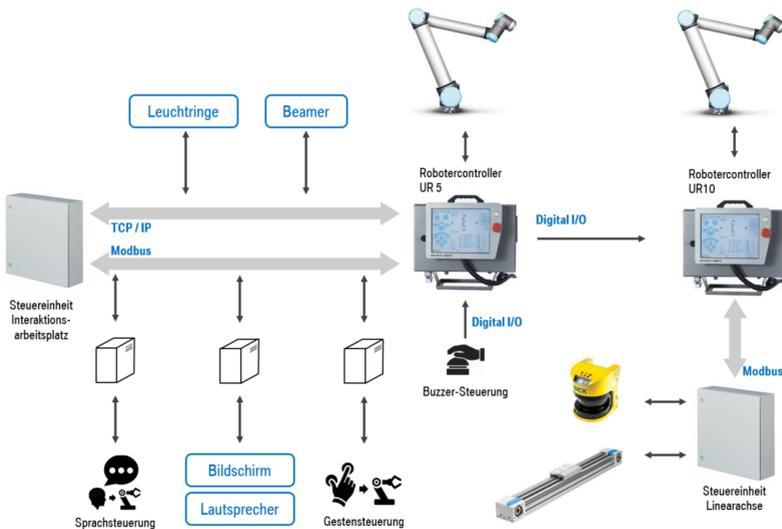


Abb. 6.8: Schematischer Überblick der Kommunikationsstruktur des Interaktionsarbeitsplatzes.

## Robotersteuerung

Die Steuerung des Roboters durch den Menschen ist aus sicherheitstechnischen Gründen begrenzt und eng an den Prozessablauf gekoppelt. Die Abfolge der Roboterbewegungen wird dem Prozess entsprechend einpro-

grammiert und der Proband kann den nächsten Montageschritt in einer linearen Abfolge über eine Anweisung an den Roboter einleiten. Eine Wiederholung oder das Überspringen eines Prozessschrittes ist nicht möglich. Die Anweisung an den Roboter ist über den Buzzer oder per Geste möglich. Damit eine Vergleichbarkeit der Systeme gewährleistet ist, wird die Steuerung per Geste der Funktionsweise des Buzzers angepasst und auf das Fortschreiten im Prozess eingestellt. Um die Gestensteuerung nicht auf eine rein digitale Funktionsweise zu reduzieren und die Möglichkeit einer intuitiveren Prozesssteuerung zu nutzen, werden vier Gesten mit unterschiedlichen Funktionen im Prozess implementiert. Die *Flat Palm*-Geste wird zur Anforderung von Teilen genutzt, die *OK*-Geste zur Einleitung einer Prüfung durch den Roboter und die *Thumb Right/Left*-Geste in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung des Roboters zum Starten eines neuen Prozessschritts (vgl. Abb. 5.3).

### **Messwerkzeuge**

Die Messung der Zielgrößen wird über zwei Kamerasysteme umgesetzt. Die Dokumentation des Experiments sowie die Erfassung der Prozesszeit erfolgt über eine GoPro Hero 3+ Kamera, die auf der linken Seite des Überbaus am IAP montiert ist (vgl. Abb. 6.4). In ihrem Blickfeld befinden sich sowohl der Montagebereich, als auch das Bereitstellungsregal, womit alle relevanten Stellen des Prozesses aufgenommen werden. Die Erhebung der ergonomischen Daten zur physischen Beanspruchung der Probanden wird über ein weiteres Microsoft *Kinect* Tiefenkamerasystem erfasst (vgl. Kap. 2.1.2, 2.2.3). Es wird ein Motion-Capturing-System gewählt, da dieses im Vergleich zur manuellen Analyse eine aufwandsärmere Datenerfassung in Echtzeit sowie die nachträgliche Analyse über Videoaufnahmen ermöglicht (Gudehus, 2009). Diese *Kinect*-Kamera (in Abb. 6.4 nicht dargestellt) wird zwei Meter hinter dem Probanden in 1.80 m Höhe positioniert, um den gesamten Körper des Probanden zu erfassen. Da der Proband bei der ATL-Montage im Stehen arbeitet und der Fokus der Betrachtung auf Rücken-

und Armhaltung liegt, wird der Blickwinkel der Kamera um ca. 20 Grad geneigt. Diese Positionierung erlaubt eine Erfassung des Arm- und Rückenbereichs, wobei sich die Füße nicht vollständig im Blickfeld befinden. Zur Verarbeitung der Bilddaten wird die Software *Ergonautas* eingesetzt. Diese wurde von Diego-Mas entwickelt (Diego-Mas & Alcaide-Marzal, 2014) und ermöglicht die automatisierte Auswertung der Körperhaltung anhand der OWAS-Methodik (vgl. Kap. 2.1.2). Der über die Software berechnete Belastungsindex unterscheidet sich gegenüber dem Lundqvist-Index im verwendeten Wertebereich. Der Belastungsindex der Software nutzt Werte von 1.0 bis 4.0, wobei sich der resultierende Index nicht verändert. Die automatisierte Auswertung ermöglicht eine Reliabilität von 93% und findet in der Literatur eine hohe Anerkennung. Als Messintervall der Kodierung werden zehn Sekunden gewählt, die Anzahl der Kodierungen pro Proband und Versuch richtet sich demnach nach dessen Dauer. Das gewählte Intervall bildet einen Kompromiss aus der Empfehlung von Louhevaara und Suurnäkki für ein Intervall von 30 oder 60 Sekunden (Gudehus, 2009) und einer quasi-kontinuierlichen Messung.

### **Fragebogen**

Die Erfassung subjektiver Daten erfolgt über einen Fragebogen mit drei Themenblöcken. Ziel ist es, die subjektive Wahrnehmung der Probanden bezüglich des Effekts der Einflussfaktoren auf die Zielgrößen zu erfragen. Der erste Block des Fragebogens mit dem Thema Arbeitsprozess dient der Erfassung der Wahrnehmung der MRI in den verschiedenen Konzepten sowie der Robotersteuerung. Der Fokus liegt auf der subjektiven Empfindung des Menschen gegenüber dem Roboter als Partner im Arbeitsprozess. Die Items orientieren sich an den von Hoffman (2013) definierten Fragen zur Bewertung der flüssigen Interaktion. Gefragt wird unter anderem nach dem Grad an Vertrauenswürdigkeit, Zuverlässigkeit oder Flüssigkeit der Zusammenarbeit innerhalb der Konzepte. Zudem wird das Verständnis der Aktionen des Roboters erfragt, sowie, ob dieses durch den Einsatz von

Informationsmodulen verbessert wird. Der zweite Block dient der Analyse der Informationsmodule. Diese werden hinsichtlich ihrer Eignung als Informationssystem bewertet. Der letzte Fragenblock zu Ergonomie bezieht sich auf die Wahrnehmung der Probanden während des Versuchs. Es wird das subjektive Empfinden der physischen und psychischen Belastung in Abhängigkeit der einzelnen Konzepte analysiert. Den Abschluss bildet eine offene Frage zu Experiment und Rückmeldung des Probanden. Der vollständige Fragebogen befindet sich im Anhang (Abb. A.6).

### **Stichprobe**

Um ein möglichst ausgeglichenes Ergebnis für das Experiment zu erzeugen, werden Probanden mit einem heterogenen Hintergrund gewählt. Diese Gruppe wird gewählt, da Werker aus der Motorenmontage zum einen nicht in der benötigten Anzahl und zum anderen aus organisatorischen Gründen nicht verfügbar sind. Die Auswahl der Probanden erstreckt sich von fachnahen Studenten bis zu fachfremden Berufstätigen. Aufgrund des heterogenen Hintergrunds sind unterschiedliche Leistungen der Probanden zu erwarten. Im Rahmen des vollständigen Versuchsplans ist dies von Vorteil, da eventuelle Wechselwirkungen besser identifiziert werden können. Insgesamt nehmen  $N=26$  Probanden teil, die sich aus  $N=21$  männlichen und  $N=5$  weiblichen Teilnehmern zusammensetzen. Bei der Datenerfassung zweier Probanden traten während des Versuchs Fehler auf, weshalb die objektiven Daten in der Analyse nicht verwertet werden. Die subjektiven Daten waren davon nicht beeinflusst.

### **6.3.1.3 Versuchsdurchführung**

Die Durchführung des Versuchs unterteilt sich in vier Abschnitte. Jeder Proband durchläuft eine Einführungs-, Übungs-, Versuchs- sowie eine Feedbackphase. Zu Beginn des Experiments werden die Probanden anhand einer Präsentation in das Experiment bzw. den experimentellen Aufbau, dessen

Hintergrund sowie die Grundlagen der MRI eingewiesen. Der Ablauf wird durchgesprochen und die Probanden werden auf die Videoaufnahmen hingewiesen. In der anschließenden Übungsphase trainiert der Proband die Montage des ATLS auf einer Werkbank. Jeder Proband durchläuft zwei Testläufe, bei denen er durch den Versuchsleiter unterstützt wird. Ziel ist es, jegliche Unklarheiten zu beseitigen und einen möglichst einheitlichen Wissensstand unter den Probanden herzustellen.

Im Versuchsabschnitt erfolgt die Datenerhebung gemäß Versuchsplan. Jeder Proband startet und beendet den Versuch mit dem manuellen Konzept *K0*. Die Reihenfolge der anderen Konzepte variiert dem Versuchsplan entsprechend zusammen mit der gewählten Robotersteuerung sowie dem Einsatz der Informationsmodule. Vor jedem Versuchsdurchlauf klärt der Versuchsleiter den Proband über Konzept und Steuerungsform des Durchlaufs auf. Abbildung Abb. 6.9 zeigt eine Übersicht des Montagebereichs des IAPs in Abhängigkeit der verschiedenen Konzepte mit aktiven Informationsmodulen. Der Versuch endet mit dem Ausfüllen des Fragebogens durch den Probanden. Der anwesende Versuchsleiter unterstützt bei eventuellen Fragen.

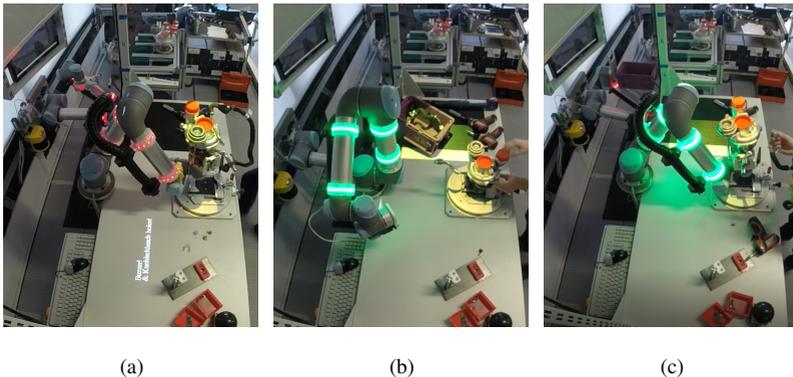


Abb. 6.9: Übersicht über die Konzepte *K1-K3* mit Einsatz aller Informationsmodule; (a) Handlingskonzept (*K1*), (b) Logistikkonzept (*K2*), (c) Kombikonzept (*K3*).

### 6.3.2 Ergebnis

Der nächste Abschnitt präsentiert die Versuchsergebnisse. Die statistische Datenauswertung erfolgt anhand der Programmiersprache R (Version 3.4.1) mittels der Umgebung RStudio. Bezüglich der Zielgröße Prozesszeit wird der Einfluss der Faktoren Montagekonzept, Robotersteuerung, Informationsmodul sowie die ermittelten Zeiten im Rahmen der PIS vorgestellt. In Bezug auf die Ergonomie werden die Effekte von Montagekonzept und Robotersteuerung betrachtet. Abschließend werden die Ergebnisse des Fragebogens dargelegt.

#### 6.3.2.1 Einfluss von Montagekonzept und Robotersteuerung auf die Prozesszeit

Die Auswertung der messwiederholten Daten erfolgt aufgrund der Verletzung der Normalverteilungsannahme über den Friedman-Test. In diesem werden die Varianten der Faktoren Montagekonzept ( $K0$ ,  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ) sowie Robotersteuerung (Buzzersteuerung, Gestensteuerung) untersucht. Das Referenzkonzept  $K0$  entfällt bei der Betrachtung des Faktors Robotersteuerung und dient als Vergleichswert. Die Ergebnisse werden in Tabelle 6.5 dargestellt und im Folgenden erläutert.

Tab. 6.5: *Testergebnisse der Prozesszeitdaten unter dem Einfluss der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung mittels des Friedman-Tests ( $N=24$ ). Angegeben sind der  $\chi^2$ -Wert, die Freiheitsgrade sowie die Wahrscheinlichkeit ( $p$ -Wert)*

Effekt	$\chi^2$	$df$	$p$
Montagekonzept	51.1	3	<.001
Steuerung	20.6	1	<.001
Montagekonzept x Steuerung	68.3	5	<.001

### Haupteffekt Montagekonzept

Die Prozesszeiten der Montagekonzepte weisen signifikante Unterschiede auf ( $\chi^2 = 51.1, p < .001$ ), die sich bereits in der Betrachtung der Mittelwerte zeigen (vgl. Abb. 6.10). Die Nullhypothese, die auf der Effektivität des Montagekonzepts in Bezug auf die Prozesszeit basiert, kann somit verworfen werden. Die Ergebnisse der Bonferroni korrigierten post-hoc Analyse sind in Tabelle 6.6 dargestellt. Es zeigt sich eine signifikante Differenz zwischen *K1* und den restlichen Konzepten sowie zwischen *K2* und *K3*. Von *K0* zu *K3* kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

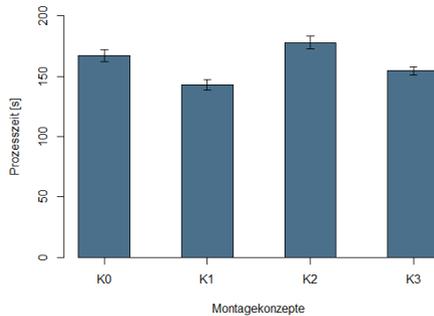


Abb. 6.10: Prozesszeit in Abhängigkeit der Montagekonzepte *K0*, *K1*, *K2*, *K3* ( $N=24$ ). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwerts der abhängigen Stichproben.

Tab. 6.6: Post-Hoc Vergleich der Prozesszeit in Abhängigkeit des Faktors Montagekonzept über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem  $p$ -Wert

MK <sub>1</sub>	MK <sub>2</sub>	MW <sub>1</sub>	MW <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	V	df	p
K1	K0	147.9	172.4	138.5	167.0	197	3	<.001
K2	K0	179.7	172.4	181.5	167.0	847	3	.15
K3	K0	158.0	172.4	151.5	167.0	380.5	3	.006
K1	K2	147.9	179.7	138.5	181.5	51.5	3	<.001
K1	K3	147.9	158.0	138.5	151.5	345	3	<.05
K3	K2	158.0	179.7	151.5	181.5	200	3	<.001

Anmerkung. Der Bonferroni korrigierte  $p$ -Wert liegt bei  $p=.002$ , aufgeführt sind Montagekonzept (MK), Mittelwert (MW) in [s], Median (M) in [s], Teststatistik (V) und Anzahl der Freiheitsgrade (df) für Montagekonzept Referenzkonzept (K0), Handlingskonzept (K1), Logistikkonzept (K2) und Kombikonzept (K3).

### Haupteffekt Robotersteuerung

Der Faktor Robotersteuerung weist, wie in Abbildung Abb. 6.11 visualisiert, in Bezug auf die Prozesszeit einen signifikanten Unterschied auf ( $\chi^2 = 20.6, p < .001$ ). Die post-hoc Analyse mit einem einseitigen Wilcoxon-Test zeigt, dass die Prozessdauer unter Verwendung der Gestensteuerung signifikant länger ist. Der Vergleich der Mittelwerte zwischen manuellen Referenzkonzept ( $MW_{K0} = 167.1s$ ) und Montagekonzepten mit Gestensteuerung ergibt eine Differenz 0.9 s ( $MW_G$ ). Der zwischen Buzzersteuerung und den manuellen Werten einen Unterschied von 16.2 s ( $MW_B$ , vgl. Tabelle 6.7).

Tab. 6.7: Post-Hoc Vergleich der Prozesszeit in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem  $p$ -Wert

RS <sub>1</sub>	RS <sub>2</sub>	MW <sub>B</sub>	MW <sub>G</sub>	M <sub>B</sub>	M <sub>G</sub>	V	df	p
B	G	150.9	166.1	144.0	158.5	410	1	<.001

Anmerkung. Der Bonferroni korrigierte  $p$ -Wert liegt bei  $p=.002$ , aufgeführt sind Robotersteuerung (RS), Mittelwert (MW) in [s], Median (M) in [s], Teststatistik (V) und Anzahl der Freiheitsgrade (df) für die Steuerung per Geste (G) und Buzzer (B).

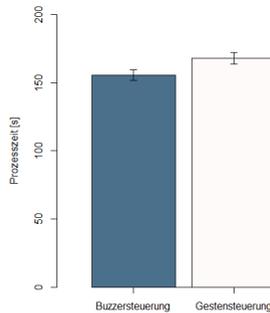


Abb. 6.11: Prozesszeit in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung (N=24). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwerts der abhängigen Stichproben.

### Interaktion Montagekonzept und Steuerung

Die Interaktion beider Faktoren weist ebenfalls einen signifikanten Unterschied auf ( $\chi^2 = 68.3, p < .001$ ). In der post-hoc Analyse mittels einseitigem Wilcoxon-Test wird das Referenzkonzept *K0* nicht betrachtet, da der Faktor Robotersteuerung darauf keinen Einfluss ausübt. Die Betrachtung der Mittelwerte (vgl. Tabelle 6.8) zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den Robotersteuerungen Buzzer und Geste der Konzepte *K1* und *K3* auf, der sich auch in Abbildung Abb. 6.12 widerspiegelt.

Tab. 6.8: *Post-Hoc Vergleich der Prozesszeit in Abhängigkeit der Interaktion der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert*

Montagekonzept	$MW_B$	$MW_G$	$M_B$	$M_G$	$V$	$df$	$p$
Handlingskonzept <i>K1</i>	135.0	150.8	135.0	141.0	42.5	2	.001
Logistikkonzept <i>K2</i>	171.5	184.5	173.0	181.5	42.5	2	.006
Kombikonzept <i>K3</i>	146.2	162.9	147.0	158.5	43.0	2	<.001

*Anmerkung.* Der Bonferroni korrigierte  $p$ -Wert liegt bei  $p=.002$ , aufgeführt sind Mittelwert ( $MW$ ) in [s], Median ( $M$ ) in [s], Teststatistik ( $V$ ) und Anzahl der Freiheitsgrade ( $df$ ) für die Steuerung per Geste (G) und Buzzer (B).

Das Konzept *K2* weist einen nicht signifikanten *p*-Wert auf. Die Analyse zeigt, dass die Wahl der Steuerung im Fall von *K1* und *K3* einen signifikanten Einfluss auf die Prozesszeit hat.

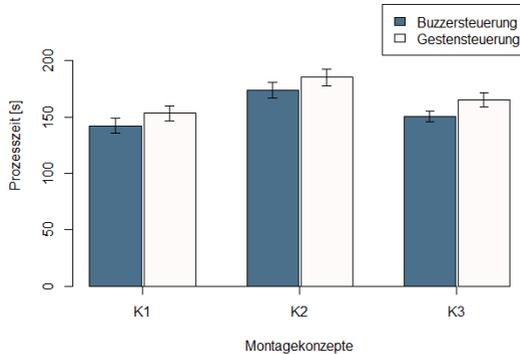


Abb. 6.12: Prozesszeit in Abhängigkeit der Faktoren Robotersteuerung und Montagekonzept (N=24). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwerts der abhängigen Stichproben.

### 6.3.2.2 Vergleich der experimentell ermittelten Prozesszeiten mit den MTM-Zeitwerten

Der Vergleich der Prozesszeiten zeigt einen signifikanten Einfluss von Montagekonzept und Robotersteuerung. Eine Aussage, in wie weit die in der Praxis gemessenen Zeitwerte mit den theoretisch ermittelten übereinstimmen und dementsprechend die Erwartungen erfüllen, lässt sich anhand einer Gegenüberstellung der Zeiten treffen. Die ermittelten MTM-Zeitwerte (vgl. Kap. 6.2) werden in Tabelle 6.9 mit den Kennwerten der experimentell gemessenen Zeiten verglichen.

Tab. 6.9: Vergleich der theoretisch ermittelten MTM-Zeitwerte [s] und den experimentell gemessenen Prozesszeiten [s]

	<b><i>K0</i></b>	<b><i>K1<sub>B</sub></i></b>	<b><i>K1<sub>G</sub></i></b>	<b><i>K2<sub>B</sub></i></b>	<b><i>K2<sub>G</sub></i></b>	<b><i>K3<sub>B</sub></i></b>	<b><i>K3<sub>G</sub></i></b>
MTM	125.1	108.7	105.1	112.1	109.0	105.4	100.9
<i>M</i>	156.5	132.5	142.8	174.8	182.5	148.8	160.2
<i>MW</i>	167.1	135.0	150.8	171.5	184.5	146.2	162.9
<i>Min</i>	121.0	102.8	102.0	121.9	133.9	125.0	120.9
<i>Max</i>	235.0	199.0	261.0	268.0	285.0	168.0	229.0

*Anmerkung.* Aufgeführt sind Median (*M*), Mittelwert (*MW*), Minimum (*Min*) und Maximum (*Max*) für die Zeitwerte von Referenzkonzept (*K0*), Handlingskonzept (*K1*), Logitikkonzept (*K2*) und Kombikonzept (*K3*) in Kombination mit der Robotersteuerung per Buzzer (*B*) oder Geste (*G*).

Die Erwartung, dass die kollaborative Prozessgestaltung gegenüber der manuellen Zeit einspart, kann nur teilweise erfüllt werden. Dies gilt für die Varianten *K1<sub>B</sub>*, *K1<sub>G</sub>* sowie *K3<sub>B</sub>*, die die geringste Streuung der Daten aufweist. Auch die theoretische Einordnung der Konzepte hinsichtlich ihres Potentials auf Zeitersparnis kann nicht bestätigt werden. *K1<sub>B/G</sub>* schneidet besser ab als *K3<sub>B/G</sub>* und *K2<sub>B/G</sub>* und weist die deutlichste Differenz zwischen theoretisch erwartetem und praktischem Wert auf. Es zeigt sich insbesondere ein deutlicher Einfluss der Robotersteuerung. Über alle Varianten ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung des Medians von 47% (minimale durchschn. Abweichung bei *K1<sub>B</sub>* von 21.8%, maximale durchschn. Abweichung bei *K2<sub>G</sub>* von 67.4%).

### 6.3.2.3 Analyse der Zeitanteile und des Interaktionsfluss

Die Analyse der Prozesszeitanteile von Mensch und Roboter erfolgt nach der Systematik der Prozessinteraktionsanalyse, die in Kap. 4 vorgestellt wurde. Die auf Durchschnittswerten basierende Verteilung der Zeitanteile zeigt Abbildung Abb. 6.13. In Abhängigkeit der Montagekonzepte und Robotersteuerungen ergeben sich für das Verhältnis von AZM zu IZM, AZR zu IZR sowie ZDI zu ZII sechs charakteristische Verteilungsprofile, deren Werte in Tabelle 6.10 zusammengefasst werden. Die aus der Verteilung hervorgehenden Kennzahlen der PIS sind in Abhängigkeit von Montagekonzept und Robotersteuerung in Tabelle 6.11 aufgeführt.

Tab. 6.10: Einordnung der durchschnittlichen Zeitanteile [s] von Mensch und Roboter entsprechend der Prozessinteraktionssystematik

	<i>K1<sub>B</sub></i>	<i>K1<sub>G</sub></i>	<i>K2<sub>B</sub></i>	<i>K2<sub>G</sub></i>	<i>K3<sub>B</sub></i>	<i>K3<sub>G</sub></i>
<b>AZM</b>	129.2	145.8	161.1	170.5	131.4	145.2
<b>IZM</b>	4.4	4.6	11.4	11.0	16.7	17.3
<b>AZR</b>	22.3	22.1	100.8	100.1	112.4	112.0
<b>IZR</b>	111.3	128.3	71.7	81.3	35.7	50.5
<b>% IZM</b>	3.3	3.1	6.6	6.0	11.3	10.6
<b>% IZR</b>	83.3	85.3	41.6	44.8	24.1	31.3
<b>GZA</b>	17.9	17.5	89.4	89.2	95.6	94.7
<b>% GZA</b>	13.4	11.6	51.9	49.2	64.6	58.3
<b>ZDI</b>	6.4	12.3	23.9	33.3	20.4	29.5
<b>ZII</b>	11.5	5.2	65.5	55.9	75.2	65.2
<b>PVZ</b>	4.4	4.6	11.4	11.0	16.7	17.3

*Anmerkung.* Aufgeführt sind Handlingskonzept (*K1*), Logistikkonzept (*K2*) und Kombikonzept (*K3*) mit Robotersteuerung per Buzzer (B) oder Geste (G), sowie Aktive Zeit des Menschen (AZM), Inaktive Zeit des Menschen (IZM), Aktive Zeit des Roboters (AZR), Inaktive Zeit des Roboters (IZR), Zeitanteil gleichzeitiger Aktivität (GZA), Zeit direkter Interaktion (ZDI), Zeit indirekter Interaktion (ZII) und Prozessverzögernder Zeitanteil (PVZ).

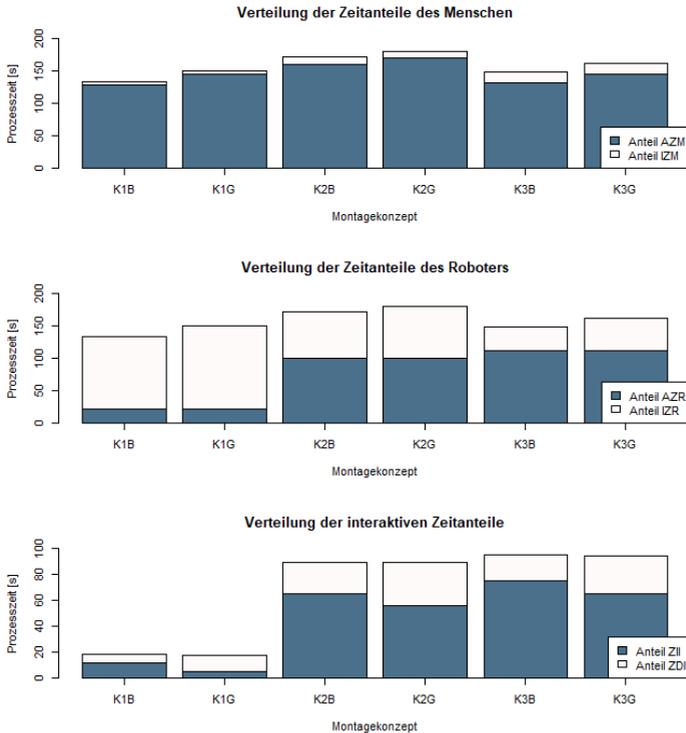


Abb. 6.13: Verteilung der Zeitanteile von Aktiver (AZM) und Inaktiver Zeit des Menschen (IZM), Aktiver (AZR) und Inaktiver Zeit des Roboters (IZR) sowie Zeit direkter Interaktion (ZDI) und Zeit indirekter Interaktion (ZII) in Abhängigkeit von Handlingskonzept ( $K1$ ), Logistikkonzept ( $K2$ ) und Kombikonzept ( $K3$ ) und Robotersteuerung per Buzzer (B) oder Geste (G) über die Prozesszeit auf Basis von Durchschnittswerten.

Die postulierten Empfehlungen zur Prozessgestaltung werden durch die Kenngrößen erreicht. Alle sechs Varianten besitzen eine positive MRPE und die MPE sind stets größer als die RPE. Der Kollaborationsgrad ist vor allem bei  $K1$  relativ gering, erhöht sich durch den Einsatz des Roboters für die Teilebereitstellung jedoch auf einen akzeptablen Wert. Die Kollaborationseffizienz zeigt bei  $K1$  und vor allem bei  $K1_G$  einen sehr hohen Wert, was

Tab. 6.11: Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte

	$K1_B$	$K1_G$	$K2_B$	$K2_G$	$K3_B$	$K3_G$
<b>MRPE</b>	0.13	0.12	0.35	0.33	0.43	0.39
$\varphi_k$	0.12	0.10	0.34	0.33	0.39	0.37
$\vartheta_k$	0.56	2.37	0.36	0.60	0.27	0.45
$\kappa_k$	0.56	-1.26	0.98	0.73	1.12	0.92
<b>PIE</b>	0.70	-1.14	1.32	1.06	1.55	1.30

*Anmerkung.* Aufgeführt sind Handlingskonzept ( $K1$ ), Logistikkonzept ( $K2$ ) und Kombikonzept ( $K3$ ) mit Robotersteuerung per Buzzer (B) oder Geste (G), sowie Mensch-Roboter-Prozesseffizienz (MRPE), Kollaborationsgrad ( $\varphi_k$ ), Kollaborationseffizienz ( $\vartheta_k$ ), Kollaborationskoeffizient ( $\kappa_k$ ) und Prozessinteraktionseffizienz (PIE).

bedeutet, dass die Interaktion nicht flüssig abläuft. Den niedrigsten Wert zeigt  $K3$  mit der Steuerung per Buzzer. Konzept  $K3_B$  erhält mit dem jeweils höchsten Wert für MRPE sowie für den Kollaborationseffizienten mit 1.55 die höchste PIE.

### 6.3.2.4 Einfluss von Montagekonzept und Robotersteuerung auf die Ergonomie

Die Auswertung der messwiederholten Daten erfolgt aufgrund der quasi-ordinalen Datenstruktur über den Friedman-Test. In diesem wird der Einfluss der Faktoren Montagekonzept ( $K0$ ,  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ) sowie Robotersteuerung (Buzzersteuerung, Gestensteuerung) untersucht. Das Referenzkonzept  $K0$  wird, wie im vorherigen Abschnitt, in Bezug auf den Faktor Robotersteuerung nicht in die statistische Analyse miteinbezogen. Die Ergebnisse werden in Tabelle 6.12 dargestellt und im Folgenden erläutert.

Tab. 6.12: Testergebnisse des Belastungsindex unter dem Einfluss der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung mittels des Friedman-Tests ( $N=24$ ). Angegeben sind der  $\chi^2$ -Wert, die Freiheitsgrade sowie die Wahrscheinlichkeit ( $p$ -Wert)

Effekt	$\chi^2$	$df$	$p$
Montagekonzept	68.2	3	<.001
Steuerung	10.3	1	<.01
Montagekonzept x Steuerung	52.2	5	<.001

#### Haupteffekt Montagekonzept

Der Faktor Montagekonzept weist, wie in Abbildung Abb. 6.14 zu sehen, bzgl. der Prozesszeit signifikante Unterschiede auf ( $\chi^2 = 68.2$ ,  $p < .001$ ), womit die Nullhypothese verworfen werden kann. Die Ergebnisse der Bonferroni korrigierten post-hoc Analyse sind in Tabelle 6.13 dargestellt. Über die einseitig durchgeführten Wilcoxon-Tests ergibt sich zwischen allen Konzepten ein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Belastungsindex. Aus den Ergebnissen kann, beginnend mit dem kleinsten Index, folgende Rangfolge abgeleitet werden:  $K3$ ,  $K1$ ,  $K2$  und  $K0$ .

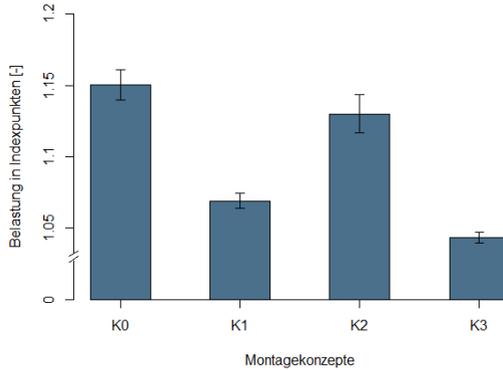


Abb. 6.14: Belastungsindex in Abhängigkeit der Montagekonzepte  $K0$ ,  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  ( $N=24$ ). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwerts der abhängigen Stichproben.

Tab. 6.13: *Post-Hoc Analyse des Belastungsindex in Abhängigkeit des Faktors Montagekonzept über den Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem  $p$ -Wert*

MK <sub>1</sub>	MK <sub>2</sub>	MW <sub>1</sub>	MW <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	V	df	p
K1	K0	1.07	1.15	1.04	1.13	4	3	<.001
K2	K0	1.14	1.15	1.09	1.13	70	3	<.05
K3	K0	1.05	1.15	1.01	1.13	1	3	<.001
K1	K2	1.07	1.14	1.04	1.09	499	3	<.001
K3	K1	1.07	1.05	1.04	1.01	0	3	<.001
K3	K2	1.05	1.14	1.01	1.09	432	3	<.001

*Anmerkung.* Der Bonferroni korrigierte  $p$ -Wert liegt bei  $p=.002$ , aufgeführt sind Montagekonzept (MK), Mittelwert (MW), Median (M), Teststatistik (V) und Anzahl der Freiheitsgrade (df) für Montagekonzept Referenzkonzept (K0), Handlingskonzept (K1), Logistikkonzept (K2) und Kombikonzept (K3).

### Haupteffekt Robotersteuerung

Auch der Faktor Robotersteuerung wirkt sich signifikant auf den Belastungsindex ( $\chi^2 = 10.3, p < .001$ ) aus (vgl. Abb. 6.15). Der einseitige Wilcoxon-Test zur Analyse der Ergebnisse zeigt, dass der Index bei Verwendung der Gestensteuerung signifikant größer ist (vgl. Tabelle 6.14). Der Referenzvergleich der Mittelwerte zur manuellen Montage ( $MW_{man} = 1.15$ ) weist eine deutliche Differenz auf.

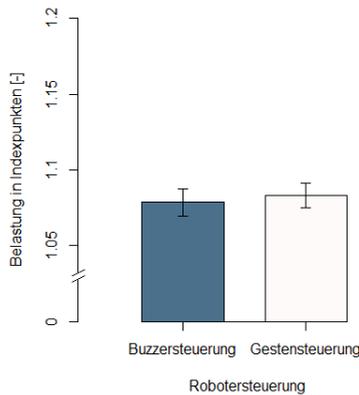


Abb. 6.15: Belastungsindex in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung (N=24). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwerts der abhängigen Stichproben.

Tab. 6.14: Post-Hoc Vergleich des Belastungsindex in Abhängigkeit des Faktors Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem  $p$ -Wert

RS <sub>1</sub>	RS <sub>2</sub>	MW <sub>B</sub>	MW <sub>G</sub>	M <sub>B</sub>	M <sub>G</sub>	V	df	p
B	G	1.08	1.08	1.06	1.06	445	1	<.001

Anmerkung. Der Bonferroni korrigierte  $p$ -Wert liegt bei  $p=.002$ , aufgeführt sind Robotersteuerung (RS), Mittelwert (MW), Median (M), Teststatistik (V) und Anzahl der Freiheitsgrade (df) für die Steuerung per Geste (G) und Buzzer (B).

### Interaktion Montagekonzept und Steuerung

Die Interaktion beider Faktoren ergibt bei Betrachtung der Mittelwerte (vgl. Abb. 6.16) eine signifikante Differenz des Belastungsindex ( $\chi^2 = 52.2, p < .001$ ). In der post-hoc Analyse mittels eines einseitigen Wilcoxon-Tests wird festgestellt, dass zwischen der Robotersteuerung und dem Montagekonzept in *K1* und *K2* kein signifikanter Unterschied besteht. In *K3* ist der Unterschied signifikant, womit die Steuerung durch einen Buzzer einen geringeren Index hervorruft als die durch Gesten (vgl. Tabelle 6.15).

Tab. 6.15: *Post-Hoc Vergleich des Belastungsindex in Anhängigkeit der Interaktion der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung über einseitigen Wilcoxon-Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert*

Montagekonzept	$MW_B$	$MW_G$	$M_B$	$M_G$	$V$	$df$	$p$
Handlingskonzept ( <i>K1</i> )	1.07	1.07	1.07	1.07	10.5	2	.39
Logistikkonzept ( <i>K2</i> )	1.13	1.13	1.15	1.17	51.5	2	.71
Kombikonzept ( <i>K3</i> )	1.04	1.05	1.04	1.06	0	2	<.001

*Anmerkung.* Der Bonferroni korrigierte  $p$ -Wert liegt bei  $p=.002$ , aufgeführt sind Mittelwert ( $MW$ ), Median ( $M$ ), Teststatistik ( $V$ ) und Anzahl der Freiheitsgrade ( $df$ ) für die Steuerung per Geste (G) und Buzzer (B).

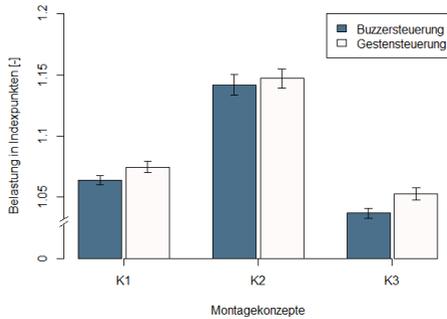


Abb. 6.16: Belastungsindex in Abhängigkeit der Faktoren Robotersteuerung und Montagekonzept (N=24). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwerts der abhängigen Stichproben.

### 6.3.2.5 Einfluss der Interaktionsmodule auf Prozesszeit und Ergonomie

Als sekundärer Faktor wird der Einfluss der Informationsmodule auf Prozesszeit und Ergonomie separat betrachtet. Dies geht aus der Versuchsplanung hervor, da jeweils die Hälfte der Probanden mit bzw. ohne die Informationsmodule gearbeitet hat und somit eine andere Stichprobe vorliegt.

#### Betrachtung des Effekts auf die Prozesszeit

Die messwiederholten Daten verletzen die Normalverteilungsannahme, wodurch die Evaluation über den Friedman-Test erfolgt. Die Ergebnisse des Haupteffekts sowie der Interaktionseffekte werden in Tabelle 6.16 dargestellt und im Folgenden erläutert.

Die Betrachtung der Mittelwerte der Gruppe mit Informationsmodulen sowie der Kontrollgruppe zeigt bereits ähnliche Zeiten ( $MW_{\text{mInfo.mod.}} = 157.4s, MW_{\text{Kontroll}} = 150.1s$ ). Der sekundäre Faktor Informationsmodule ist dementsprechend nicht signifikant. Die beiden Gruppen unterscheiden sich somit nicht in ihrer Prozesszeit. Die Interaktionseffekte zeigen eine

Tab. 6.16: Testergebnisse der Prozesszeitdaten unter dem Einfluss der Informationsmodule (IM) sowie deren Interaktionseffekte mit den Faktoren Montagekonzept (MK) und Robotersteuerung (RS) mittels des Friedman-Tests ( $N=12$ ). Angegeben sind der  $\chi^2$ -Wert, die Freiheitsgrade sowie die Wahrscheinlichkeit ( $p$ -Wert)

Effekt	$\chi^2$	$df$	$p$
IM	2.8	1	.09
IM x MK	50.3	5	<.001
IM x RS	26.8	3	<.001
IM x MK x RS	55.9	11	<.001

Signifikanz, die in der post-hoc Analyse auf den Einfluss der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung zurückgeführt werden kann. Den Informationsmodulen kann somit kein Effekt auf die Prozesszeit nachgewiesen werden.

### **Betrachtung des Effekts auf die Ergonomie**

Die Evaluation erfolgt nach Verletzung der Normalverteilungsannahme über den Friedman-Test. Die Ergebnisse des Belastungsindex unter dem Einfluss der Informationsmodule ergeben bei  $N=12$  einen  $p$ -Wert von  $p=.07$  ( $\chi^2 = 3.2, df = 1$ ), womit der sekundäre Faktor Informationsmodule nicht signifikant ist und sich beide Gruppen in ihrem Belastungsindex nicht differenzieren. Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt zudem, wie bei Betrachtung der Prozesszeit, fast identische Werte ( $MW_{\text{mInfo.mod.}} = 1.06, MW_{\text{Kontroll}} = 1.06$ ). Auf eine explizite Analyse der Interaktionseffekte wird in diesem Zusammenhang verzichtet, da nach der nicht vorhandenen Signifikanz des Haupteffekts kein Einfluss der Informationsmodule auf diese gegeben ist (vgl. Analyse des Effekts auf Prozesszeit).

### 6.3.2.6 Subjektive Wahrnehmung

Die in Ergänzung zur objektiven Datenerhebung über einen Fragebogen generierten Daten beziehen sich auf die Wahrnehmung von Montageprozess, Interaktionsmodulen und Ergonomie. Es werden alle Datensätze der N=26 Teilnehmer ausgewertet, da die teilweise fehlerhafte Datenerfassung sich nicht auf den subjektiven Datensatz auswirkt (vgl. Kap. 6.3.1.2).

#### Montageprozess

Die Bewertung der Prozesssteuerung durch die Probanden zeigt Abbildung Abb. 6.17. Auf einer Skala von *sehr gut* bis *sehr schlecht*, wird der Einfluss auf den Prozess mit *eher gut* bewertet. Die Buzzersteuerung wird bezüglich der Verlässlichkeit und der Langzeiteignung besser empfunden und eindeutiger bewertet als die Gestensteuerung. Diese Angaben spiegeln sich auch in der Gesamtbewertung wieder, die Buzzersteuerung wird als *sehr gut*, die Gestensteuerung als *eher gut* empfunden.

Die Arbeitsaufteilung innerhalb der Montagekonzepte wird für das Kombikonzept (*K3*) mit *sehr gut*, das Handlingskonzept (*K1*) mit *gut* und das Logistikkonzept (*K2*) mit *eher gut* evaluiert. Die Ergebnisse zeigt Abbildung Abb. 6.18. Über alle Konzepte hinweg wird angegeben, dass der Mensch im Fokus steht, wobei die Zustimmung für *K3* am geringsten ist. Dieses

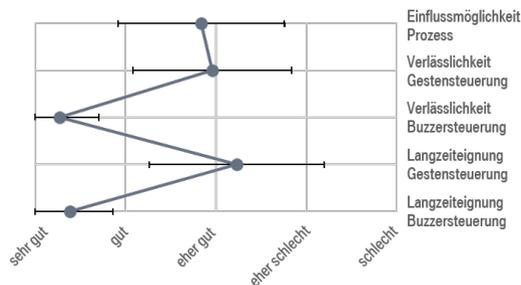


Abb. 6.17: Subjektive Bewertung der Prozesssteuerung über die Robotersteuerung. Dargestellt sind Mittelwert und zugehörige Standardabweichung.

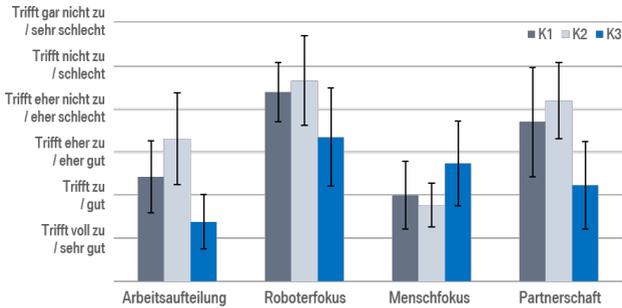


Abb. 6.18: Subjektive Bewertung der Arbeitsaufteilung und -gestaltung zwischen Mensch und Roboter in Handlingskonzept (K1), Logistikkonzept (K2) und Kombikonzept (K3). Dargestellt sind Mittelwert und zugehörige Standardabweichung.

wird in Bezug auf die Partnerschaft zwischen Mensch und Roboter jedoch als einziges positiv bewertet. Diese Angabe spiegelt sich in der Frage nach Erhöhung bzw. Verringerung des Anteils der Robotertätigkeit wieder (vgl. Abb. 6.19). Die nur bei K3 mit geschätzten 60% als richtig empfunden wird. Die Kollaboration von Proband und Roboter wird insgesamt positiv bewertet und in Abbildung Abb. 6.20 dargestellt. Dabei erhält K1 mit einer durchschnittlichen Bewertung über alle Kategorien von 1.9 BE die beste Bewertung, K3 folgt knapp mit 1.99 BE und K2 erhält 2.5 BE.

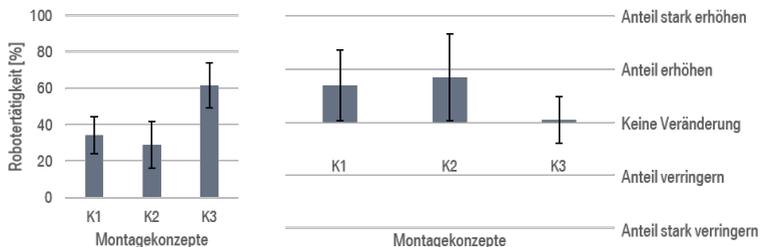


Abb. 6.19: Subjektive Wahrnehmung des Anteils der Robotertätigkeit in Handlingskonzept (K1), Logistikkonzept (K2) und Kombikonzept (K3) (links), subjektive Empfehlung zur Anpassung der Robotertätigkeit in den einzelnen Konzepten (rechts). Angegeben sind Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

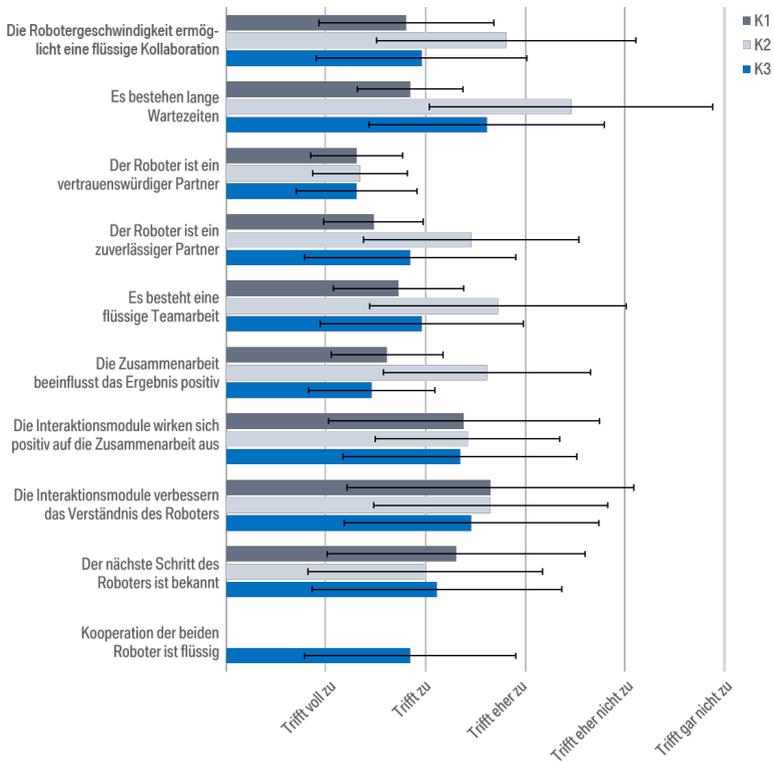


Abb. 6.20: Subjektive Bewertung der Kollaboration der Probanden mit dem/den Roboter/n in Handlingskonzept (K1), Logistikkonzept (K2) und Kombikkonzept (K3). Angegeben sind Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

Die größte Differenz zwischen den Konzepten weisen die Items *Wartezeiten* und *positive Ergebnisbeeinflussung* auf. Die schlechtere Bewertung von K2 und K3 bezüglich der Wartezeiten ist auf die Teileanlieferung des Roboters zurückzuführen. Dies geben die Probanden im offenen Kommentar an. Die größte Übereinstimmung besteht bei den Items *Vertrauen*, *Wirkung* und *Verständnis der Interaktionsmodule*. Abschließend wird die Zusammenarbeit der beiden Roboter in K3 als flüssig bewertet. In der offenen Frage nach

dem geeignetsten Konzept nennen 22 der 26 Probanden das Konzept *K3*, vier *K1* und keiner *K2*, bei dem die Bewertung der Probanden im Vergleich die größte Streuung aufweist. Zudem geben sie an, dass die Kombination aus automatisiertem Handling und Bereitstellung ausschlaggebend ist. Als mögliche Verbesserung wird die individuelle Anpassung der Arbeitshöhe an die Körpergröße des Menschen erwähnt.

### **Interaktionsmodule**

Die Evaluation der Informationsmodule erfolgt über zwei Probandengruppen. Der Referenzgruppe ( $N=12$ ) werden die Informationen nur über einen Bildschirm angezeigt, der IM-Gruppe ( $N=14$ ) stehen alle Module zur Verfügung. Letztere hebt die Informationsbereitstellung durch den Beamer hervor. Dieser wird eindeutig als sehr gut geeignet wahrgenommen ( $SD_{Beamer} = 0.84$ ). Lautsprecher ( $SD_{Lautspr.} = 1.18$ ) und Leuchtringe ( $SD_{Leuchtr.} = 1.25$ ) im Gegensatz dazu als eher schlecht. Vergleichbare Aussagen werden in Bezug auf die *dauerhafte Unterstützung*, *Zustand des Roboters* sowie *angenehme Informationsbereitstellung* getroffen (vgl. Abb. 6.21). Die Informationsfülle, die von den Informationsmodulen bereitgestellt wird, wird tendenziell als *zu hoch* empfunden. Der Vergleich der Probandengruppen hinsichtlich der Bewertung des Bildschirms als Informationsquelle ergibt eine signifikant schlechtere Bewertung der IM-Gruppe als die der Referenzgruppe ( $W=167.7$ ,  $p<.05$ ,  $N_{IM} = 14$ ,  $SD_{IM} = 1.62$ ,  $N_{Ref} = 12$ ,  $SD_{IM} = 1.05$ ). Hierzu wurde ein einseitiger Wilcoxon Rangsummentest durchgeführt. Einen Gesamtüberblick der Datenevaluation zeigt Abbildung Abb. 6.21.

Die durchgeführten Tests zur Evaluation der Wahrnehmung der Informationsmodule während des Montageprozesses ergeben, dass 36% der Probanden (IM-Gruppe) angeben, das rote Tier (ein Hirsch), das für mindestens zwei Durchläufe auf dem Bildschirm abgebildet wird, nicht gesehen zu haben. Die restlichen 64% geben dessen Farbe zu 89% richtig an. Der rote Hirsch wurde eingeblendet, um zu testen, wie aufmerksam die Probanden

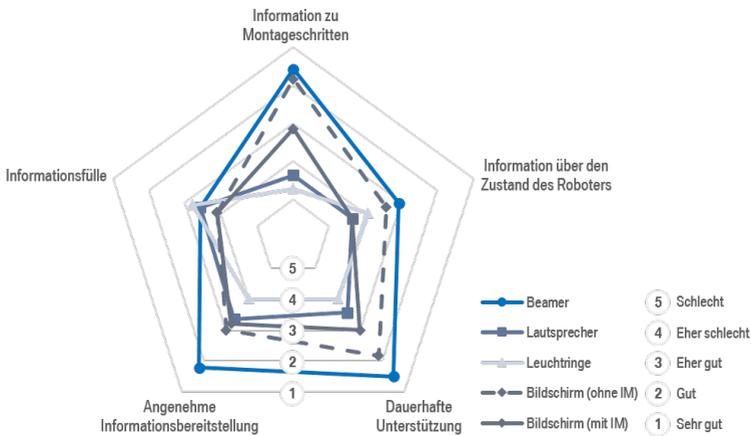


Abb. 6.21: Subjektive Bewertung der Informationsmodule bezüglich ihrer Eignung zur Bereitstellung von Information innerhalb des Montageprozesses.

die Anweisungen auf dem Bildschirm wahrnehmen, wenn andere Informationsmodule ebenfalls im Einsatz sind. 45% der Probanden können einer bestimmten Aktion des Roboters die korrekte Farbe der Leuchtringe zuordnen, insgesamt aber nur 10% das korrekte Farbmuster. Im Gegensatz dazu nehmen 93% der Probanden die farbliche Änderung der Prozessanweisung durch den Beamer korrekt wahr. Die Angaben des Lautsprechers können 43% der Probanden korrekt zuordnen. Zehn der vierzehn Probanden geben mündlich an, die Farben der Leuchtringe nicht bewusst wahrgenommen sowie die Sprachhinweise meist nicht gehört bzw. deren Inhalt nicht verstanden zu haben.

### Ergonomie

Die Angaben der Probanden zu körperlicher, psychischer sowie zeitlicher Beanspruchung zeigen allgemein eine Abnahme gegenüber dem manuellen Referenzkonzept *K0*. *K3* wird als beanspruchungsärmstes Konzept angegeben, gefolgt von *K1*, das nur in der Fragestellung körperliche Beanspruchung schlechter bewertet wird als *K2* (Abb. 6.22). Die Mehrheit der Probanden

gibt an, dass die Anlieferung ihnen Zeit einspart und sie deshalb positiv wahrgenommen wird. Andere empfinden die Anlieferung als Druck, da sie das Gefühl haben im Montageprozess zu langsam voranzuschreiten, wenn der Roboter bereits wartet. Bezüglich des Zeitdrucks beeinflusst die Teilebereitstellung die Wahrnehmung somit am stärksten. Die Komplexität nimmt in *K1* und *K3* geringfügig ab, das Handling des ATL weist dabei einen deutlicheren Effekt auf als die Teilebereitstellung.

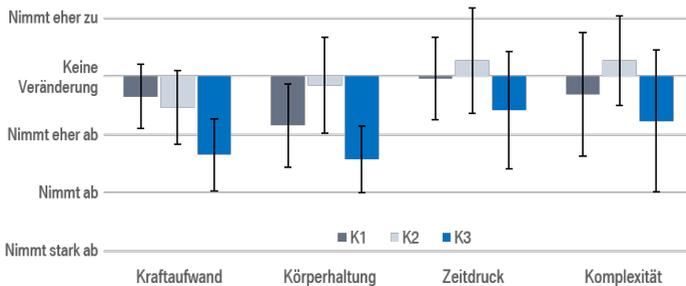


Abb. 6.22: Subjektive Bewertung der körperlichen und psychischen Beanspruchung von Handlingskonzept (*K1*), Logistikkonzept (*K2*) und Kombikonzept (*K3*) gegenüber dem Referenzkonzept (*K0*). Angegeben sind Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

Die Wahrnehmung des Stressniveaus der Probanden während der Montage stellt Abbildung Abb. 6.23 dar. Im Vergleich zum Referenzkonzept sinkt der empfundene Stress, wenn ein Roboter bei der Montage unterstützt. Bei *K1* und *K2* geben die Probanden ein Niveau leicht oberhalb des Optimums an, für *K3* liegt es leicht darunter.

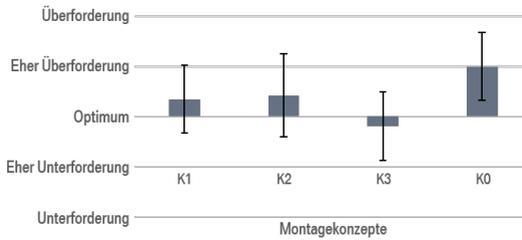


Abb. 6.23: Subjektive Bewertung des Stressniveaus während der Montage in Abhängigkeit der Montagekonzepte *K1*, *K2*, *K3* und *K0* anhand von Mittelwert und Standardabweichung.

### 6.3.3 Diskussion

Die Zielsetzung des Experiments bestand darin, zu zeigen, ob und in welchem Maße die im Rahmen der Realisierung einer Kollaboration entwickelten Montage-, Steuerungs- und Informationskonzepte zu einer zeitlichen sowie ergonomischen Verbesserung des Prozesses führen. Besonderes Augenmerk lag auf der Betrachtung der Auswirkung der unterschiedlichen Faktorstufen auf den Interaktionsfluss als zeitliche Einflussgröße des Prozesses. Die Ergebnisse des Versuchs werden im Folgenden diskutiert und in Relation zur subjektiven Wahrnehmung der Probanden gesetzt.

#### 6.3.3.1 Beeinflussende Faktoren der Prozesszeit

Die experimentell ermittelten Prozesszeiten zeigen einen signifikanten Einfluss von Montagekonzept und Robotersteuerung. Ein Effekt der Informationsmodule konnte durch den Versuch statistisch nicht abgesichert werden. Die Gegenüberstellung der theoretischen MTM-Zeitwerte mit den gemessenen Zeiten weist eine zum Teil deutliche Differenz auf (vgl. Tab. 6.9), die nicht ausschließlich auf die untersuchten Faktoren zurückzuführen ist. Da die MTM-Analyse zusammen mit Zeitwirtschaftsexperten der BMW AG erfolgte und als professioneller Richtwert dient, sind die Ursachen der Abweichung u.a. in der heterogenen Probandengruppe zu verorten. Diese wurde

gezielt aus „ungelernten“ Personen mit unterschiedlichem Hintergrund rekrutiert, um die Ergebnisse nicht durch Vorkenntnisse zu verfälschen. Unter diesem Aspekt zeigt sich das Potential der Montagekonzepte bei Betrachtung der Minima. Die durchschnittliche Abweichung zu den MTM-Zeiten über alle Varianten liegt hier bei 10% (vgl. Tab. 6.9). Neben der heterogenen Stichprobe lassen sich bei Versuchsaufbau und Motivation der Probanden wesentliche Ursachen finden, die sich nachteilig auf die Zeiterfassung auswirken.

### **Versuchsaufbau und Motivation**

Ein kritischer Faktor des Versuchsaufbaus liegt in den Einschränkungen des Laborumfelds. Im Besonderen die Nähe des Bereitstellungsregals zur Werkbank sowie der während des Experiments beobachtete Ehrgeiz mancher Probanden, verzerren die Zeiten zu Gunsten der Konzepte *K1* und *K0*. Der Bereitstellungsvorgang kann durch die geringe Distanz beschleunigt werden, während er in den automatisierten Varianten konstant bleibt. Aufgrund des geringeren Automatisierungsgrads (und der damit höheren Flexibilität) in *K0* bzw. *K1* wird die Prozesszeit durch ambitionierte Probanden stärker beeinflusst als in *K2* oder *K3*. Dieser Zusammenhang zeigt sich in der größeren Streuung der Zeiten und im Besonderen bei Betrachtung der Minima von *K0* und *K1*. Neben der Nähe des Bereitstellungsregals ist auch der limitierten Geschwindigkeit des Roboters auf der Linearachse ein Einfluss auf die Zeiten in *K2* und *K3* zuzuschreiben. Dies erfolgte aus Sicherheitsgründen und schränkt schnellere Probanden in ihrer Arbeitsgeschwindigkeit ein. Letztere bestätigen dies im Fragebogen (vgl. Abb. 6.17) und würden einen flüssigeren Ablauf der Montage erwarten. Abschließend ist die Gestensteuerung als eine maßgebliche Ursache der Abweichung von theoretischen zu praktischen Werten zu nennen. Mehrere Probanden haben mit Anzahl und Zuordnung der Gesten Probleme, die nach dem Vorversuch in Kap. 5.1 in dieser Art nicht zu erwarten waren. Dies spiegelt sich auch in der subjektiven Bewertung wieder. Die Buzzersteuerung wird deutlich als die intuitivere und verlässlichere

Steuerungsform angesehen (vgl. Abb. 6.17). Dementsprechend führen die Montagevarianten mit Gestensteuerung zu einer im Mittel um 13.4 Sekunden längeren Prozesszeit, als jene mit Buzzersteuerung (vgl. Tabelle 6.9). Dies mindert die Aussagekraft des Vergleichs beider Steuerungen.

### **Wartezeiten (Inaktive Zeiten)**

Eine detailliertere Untersuchung der Diskrepanz von theoretischen MTM und gemessenen Zeitwerten ermöglichen die Kennwerte der Prozessinteraktionsanalyse. Da der kollaborative Prozess im Fokus steht, werden in der Untersuchung neben den „aktiven“ Zeiten beider Partner auch deren potentielle Wartezeiten erfasst. Die ermittelten Werte zeigt Tabelle 6.10. Aus dieser ist ersichtlich, dass in Abhängigkeit der Montagevariante Wartezeiten des Menschen (IZM) bestehen. Die Betrachtung der Zeiteile ergibt, dass die IZM in  $K1_{B/G}$  relativ klein sind (vgl. Abb. 6.13), in  $K2_{B/G}$  und  $K3_{B/G}$  führen diese zu deutlicheren Verzögerungen von bis zu 17 Sekunden, die sich auch auf die Wahrnehmung der Probanden auswirkt (vgl. Abb. 6.20). Zudem führen diese, wie Abbildung Abb. 6.22 zeigt und von manchen Probanden angegeben, in Kombination mit einem hohen Anteil der Robotertätigkeiten in  $K3_{B/G}$  zu einer leichten Unterforderung der Probanden. Sowohl in  $K2_{B/G}$  als auch in  $K3_{B/G}$  werden bei Beobachtungen während des Versuchs drei Prozessschritte identifiziert, an denen IZM bzw. PVZ auftreten. Dies betrifft die Anlieferung des ATLS zu Beginn, die Prüfung des QR-Codes (ca. 6 Sekunden) sowie die Prüfung der Dichtung (ca. 9 Sekunden). Zu beachten ist, dass in der Planung - analog zu  $K1$  - die beiden letzten Schritte parallel zu den Tätigkeiten des Probanden vorgesehen waren. Dementsprechend wurden diese in der Zeiterhebung mittels MTM-Analyse nicht berücksichtigt. Werden die Werte aus Tabelle 6.10 herangezogen und MTM-Zeiten um den Anteil der IZM bzw. PVZ ergänzt, ergeben sich für die Montagevarianten die in Tabelle 6.17 aufgeführten Zeitwerte.

Die Anpassung der MTM-Werte führt zu einer durchschnittlichen Medianabweichung der gemessenen Zeiten von 33% und somit zu einer reduzierten

Tab. 6.17: Angepasste MTM-Zeitwerte [s] der Montagekonzepte

	$K1_B$	$K1_G$	$K2_B$	$K2_G$	$K3_B$	$K3_G$
IZM	4.4	4.6	11.4	11.0	16.7	17.3
MTM <sub>IZM</sub>	113.1	109.7	123.5	120.0	122.1	118.2

*Anmerkung.* Aufgeführt sind die um die Inaktive Zeit des Menschen (IZM) angepassten MTM-Zeitwerte (MTM<sub>IZM</sub>) für Montagekonzept Handlingskonzept ( $K1$ ), Logistikkonzept ( $K2$ ) und Kombikonzept ( $K3$ ) in Kombination mit der Robotersteuerung per Buzzer (B) oder Geste (G).

Abweichung um 14%. Dies ist immer noch deutlich. Werden die Minima verglichen, ergibt sich eine Gesamtabweichung von 0.01%. Unter der Annahme, dass diese Werte bei geschulten Probanden dauerhaft realisierbar sind, bestätigt dies die theoretischen Ergebnisse der MTM-Analyse und lässt diese als Vergleichswert zu.  $K1_{B/G}$  erweist sich mit dem geringsten Anteil an IZM, als auch mit der geringsten Abweichung von den MTM Werten in Bezug auf die Prozesszeit, als das „Beste“ der drei Montagekonzepte. Wird dieser Sachverhalt mit den Ergebnissen des Fragebogens verglichen, ist festzustellen, dass die Mehrheit der Probanden  $K3_{B/G}$  mit der höchsten IZM als favorisiertes Konzept angeben. Die Ergänzung der Teilebereitstellung durch den zweiten Roboter wird von den Versuchsteilnehmern gerne angenommen, was sich auch in der zeitlich geringen Streuung äußert. Um den Einfluss der IZM auf das Empfinden des Menschen im Prozess genauer zu untersuchen sowie mögliche Zusammenhänge zwischen der Kollaboration und den Prozesszeiten zu identifizieren, werden im Folgenden die Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik diskutiert.

### **Kollaborationseffizienz und Interaktionsfluss**

Eine andere Sichtweise auf den Montageprozess und dessen Varianten bietet die Prozessinteraktionsanalyse. Wie in Kap. 4 beschrieben, ermöglicht sie es, die Zusammenarbeit beider Prozesspartner in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Eine Übersicht der Kennwerte in Abhängigkeit von Montagekonzept und Robotersteuerung bietet Tabelle 6.18. Anhand dieser geht die Montagevariante  $K3_B$  als „bestes“ Konzept hervor. Sie hat mit einer positiven MRPE von 0.43 den höchsten Wert im Vergleichsfeld. Dies sagt laut Wertebereich aus, dass ein nicht zu vernachlässigender Anteil an GZA vorliegt und sich dieser positiv auf Effizienz und Ergebnis des Prozesses auswirkt. Die entsprechende Kennzahl für den Kollaborationsgrad von 0.39 stimmt damit überein, was ebenfalls von den Probanden honoriert wird. Hinsichtlich Partnerschaft und Arbeitsaufteilung fällt die Bewertung von  $K3_{B/G}$  deutlich besser aus als die von  $K1_{B/G}$  oder  $K2_{B/G}$  (vgl. Abb. 6.18). Die Existenz einer Partnerschaft wird nur in diesem Konzept bejaht und der Arbeitsanteil des Roboters als genau passend und angenehm empfunden (vgl. Abb. 6.19). Demgegenüber steht die Aussage der Probanden, dass  $K3_{B/G}$  eine leichte Tendenz zur Unterforderung besitzt (vgl. Abb. 6.23). Dies ist nach den Kommentaren der Probanden hauptsächlich auf die Wartezeiten im Montagekonzept zurückzuführen und nicht auf die Arbeitsaufteilung. Ein Effekt der letzten kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Der Wert der MPE ist größer als der der RPE, womit sich die Kenngrößen nach den in Kap. 4 aufgestellten Empfehlungen im richtigen Verhältnis befinden (vgl. Tabelle 4.6). Dies wird durch die Wahrnehmung der Probanden bestätigt (vgl. Roboter- bzw. Menschfokus in Abb. 6.18). Auffallend ist der stark negative Wert der RPE in  $K1_{B/G}$ , der durch die hohe IZR bedingt ist und in der niedrigen MRPE resultiert. Die Ursache kann aus der Funktion des Roboters im Montagekonzept abgeleitet werden, der hier eine reine Montageassistenz ausübt und bis auf die Qualitätsprüfung keine Tätigkeiten im Prozess übernimmt.  $K2_{B/G}$  und  $K3_{B/G}$ , in denen der Roboter über die Bereitstellung einen höheren Prozessanteil übernimmt, zeigen dementsprechend

Tab. 6.18: Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte

	$KI_B$	$KI_G$	$K2_B$	$K2_G$	$K3_B$	$K3_G$
<b>MRPE</b>	0.13	0.12	0.35	0.33	0.43	0.39
$\varphi_k$	0.12	0.10	0.34	0.33	0.39	0.37
$\vartheta_k$	0.56	2.37	0.36	0.60	0.27	0.45
$\kappa_k$	0.56	-1.26	0.98	0.73	1.12	0.92
<b>PIE</b>	0.70	-1.14	1.32	1.06	1.55	1.30

*Anmerkung.* Aufgeführt sind Handlingskonzept ( $KI$ ), Logistikkonzept ( $K2$ ) und Kombikonzept ( $K3$ ) mit Robotersteuerung per Buzzer (B) oder Geste (G), sowie Mensch-Roboter-Prozesseffizienz (MRPE), Kollaborationsgrad ( $\varphi_k$ ), Kollaborationseffizienz ( $\vartheta_k$ ), Kollaborationskoeffizient ( $\kappa_k$ ) und Prozessinteraktionseffizienz (PIE).

höhere Werte. Die Kennzahl zur Beschreibung der Kollaborationseffizienz  $\vartheta_k$  weist für  $K3_B$  den niedrigsten Wert auf. Das heißt, dass der Zeitananteil von direkter Interaktion im Verhältnis zur indirekten am geringsten ist. Hervorzuheben ist, dass in der Wahrnehmung der Probanden die Flüssigkeit der Interaktion in  $KI_{B/G}$  höher bewertet wird als in  $K3_{B/G}$  und sich auch in den kürzeren Prozesszeiten zeigt. In der Kollaborationseffizienz spiegelt sich der Einfluss der Robotersteuerung deutlich wieder. Dies zeigt den Stellenwert der Schnittstelle für eine flüssige Kollaboration und eine entsprechende Zeitreduktion. Der hohe Wert in  $K3_G$ , lässt sich auf die bereits erwähnten Probleme der Probanden mit der Gestensteuerung zurückführen. Der Zeitananteil, den die Probanden zur Anweisung des Roboters benötigen, überwiegt deutlich den Anteil in dem die beiden Partner parallel arbeiten. Über die Erfassung und Einbeziehung der kollaborativen Zeiten ermöglicht es die PIS, die Wahrnehmung der Probanden übereinstimmend abzubilden. Die einzige Diskrepanz zwischen Wahrnehmung und Kennzahl liegt in der Bewertung der flüssigen Interaktion von  $KI_{B/G}$  vor (vgl. Abb. 6.20). Diese ist auf die Wartezeiten der anderen Konzepte zurückzuführen.

### **Informationsmodule**

Der statistisch nicht nachweisbare Einfluss der Informationsmodule ist im Wesentlichen auf deren Vielzahl sowie deren Nichtbeachtung zurückzuführen. Die Unübersichtlichkeit wird in beiden Ausprägungen des Faktors ähnlich stark kritisiert. In der Bewertung ergibt sich ein ähnliches Bild wie in der Voruntersuchung (vgl. Kap. 5). Es liegt die Vermutung nahe, dass die Probanden während des Versuchs stark auf die Montage des ATL fixiert sind und die Informationsmodule, wenn überhaupt, dann maximal selektiv wahrnehmen. Dies erlaubt ihnen, im Nachgang eine Hierarchie zu bilden, eine explizite Evaluation fällt aber schwer. Hinsichtlich der Informationsfülle zeigen sich kaum Unterschiede in der Bewertung. Jedoch ist festzuhalten, dass die Module, die die Probanden bei der Tätigkeit unterstützen, deutlich besser bewertet werden. Dies geht aus der Bewertung des Beamers bzw. des Bildschirms hervor. Dass eine ergonomisch besser platzierte Informationsübermittlung honoriert wird, zeigt das Beispiel des Bildschirms. Dieser wird für sich genommen positiv wahrgenommen, die Empfindung fällt jedoch deutlich hinter die des Beamers zurück, sofern dieser zur Verfügung steht (vgl. Abb. 6.21).

In Anbetracht der Anpassung der MTM-Werte sowie den erwähnten Einschränkungen des Laborumfelds ist die Annahme der Übereinstimmung der MTM-Werte und der ermittelten Prozesszeiten zulässig. Die Zeitanalyse zeigt, dass  $K2_{B/G}$  von  $K1_{B/G}$  und  $K3_{B/G}$  in allen Kennwerten übertroffen werden und bestätigt somit die Erwartung aus der Planung. Die nachträglich um die Wartezeiten angepassten MTM-Zeiten führen ebenfalls zu keiner Änderung. Im Vergleich der Robotersteuerungen erhält die Buzzersteuerung den Vorzug. Sowohl objektive als auch subjektive Daten zeigen das gleiche Ergebnis. Die entwickelten Kennzahlen der PIS bilden die Wahrnehmung der Probanden, mit einer Ausnahme, korrekt ab und werden durch das Experiment in ihrer Aussage bestätigt.

### 6.3.3.2 Beeinflussende Faktoren der Ergonomie

Die Daten des Belastungsindex zeigen, wie die der Prozesszeit, einen signifikanten Einfluss von Montagekonzept und Robotersteuerung. Ein Effekt der Informationsmodule konnte statistisch nicht nachgewiesen werden. Für das Kombikonzept (*K3*) ergibt sich, den Erwartungen entsprechend, der geringste Belastungsindex. Dieser wird mit einer Differenz von 0.02 Indexpunkten von *K1* gefolgt. *K2*, das 0.07 Punkte hinter *K1* liegt, trennen 0.01 Indexpunkte von *K0*. Es ergeben sich zwei Paarungen mit sehr geringer interner Differenz, die nach der inferenzstatistischen Analyse signifikante Unterschiede in Abhängigkeit des Montagekonzepts aufweisen. Die Ursache für die Signifikanz kann anhand des zeitlichen Verlaufs des Belastungsindex ermittelt werden.

#### **Zeitabhängiger Belastungsindex**

Einen detaillierten Blick auf die Ergebnisse der ergonomischen Analyse in Abhängigkeit der Zeit gibt Abbildung Abb. 6.24. Die unterschiedlichen Verläufe basieren auf Mittelwerten des Index, der um Ausreißer bereinigt ist. Die Länge des Zeitintervalls entspricht dem über die Konzepte ermittelten Mittelwert. Der Anstieg bzw. Abfall des Index am Ende des Intervalls ist auf die geringere Probandendichte zurückzuführen. Der Index stützt sich auf eine kleinere Basis, weshalb einzelne Werte einen Anstieg bzw. Abfall verursachen.

Die Verläufe zeigen konzeptspezifische Muster, die sich paarweise voneinander differenzieren. Eines liegt im Anstieg des Bereichs 40 bis 60 bzw. 120 bis 140 Sekunden und das zweite, schwächere, zwischen 0 und 20 Sekunden. Die Zeitbereiche lassen sich den Tätigkeiten des ATL-Handlings und der Art der Bereitstellung zuordnen. In den Konzepten *K0* und *K2* bewegt der Proband den ATL bzw. bedient den Drehteller, auf dem der ATL fixiert ist. Zur Verschraubung der Ölrücklaufleitung muss sich der Proband bücken, um diese am ATL zu befestigen (Bereich 40-60 Sekunden). Der

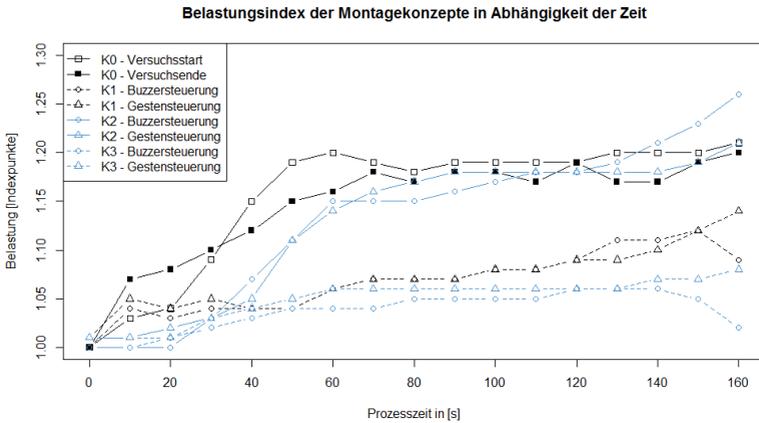


Abb. 6.24: Belastungsindex in Abhängigkeit der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung sowie der Zeit.

Prozessschritt spiegelt sich direkt im Anstieg des Belastungsindex wieder. Ähnlich wirken sich die Verschraubungen der Kühlmittleitungen auf den Index aus (Bereich 120-140 Sekunden). Der deutlichere Anstieg bei *K0* zu Versuchsbeginn gegenüber *K0* zu Versuchsende ist durch den Übungseffekt zu erklären. Das Handling des ATL durch den Roboter stellt somit einen entscheidenden Faktor für die positiveren Belastungsindices in *K1* und *K3* dar. Der zweite, schwächere Indikator mit Auswirkung auf den Index ist die Art der Bereitstellung des ATL. In *K0* und *K1* liegt diese im Aufgabenbereich des Probanden und kann in Abbildung Abb. 6.24 durch den Anstieg im Bereich 0 bis 20 Sekunden beobachtet werden. Der höhere Verlauf des Index im Vergleich von *K1* und *K3* bzw. *K0* und *K2* spiegelt das Bereitstellungs-konzept wieder. Ergänzend ist zu erwähnen, dass die manuelle Entnahme des ATL mit der im Versuchsaufbau verwendeten Messtechnik nicht vollständig erfasst werden kann. Aufgrund des im Prozessverlauf einmaligen Vorgangs und der kurzen Dauer, ist der Einfluss auf den Belastungsindex als sekundär zu betrachten.

Für den Faktor Montagekonzept entscheiden somit Tätigkeit und Anteil des Roboters am Prozessgeschehen. Das automatisierte Handling in *K1* und *K3* stellt den primären, positiven Faktor, die Bereitstellung in *K2* und *K3* den sekundären dar. Auch die subjektive Wahrnehmung der Probanden verhält sich komplementär zu den objektiven Ergebnissen der Belastungsindices. Diese bewerten die Konzepte in der Reihenfolge *K3*, *K2*, *K1*, *K0* (vgl. Abb. 6.22). In Bezug auf *K3* und *K0* stimmt diese mit der Analyse der Indices überein, *K2* und *K1* tauschen die Platzierung. *K3* mit dem höchsten Automatisierungsgrad wird den anderen Konzepten in jeder Kategorie vorgezogen. Die Kommentierung der Probanden begründet die bessere Positionierung von *K3* und *K2* gegenüber *K1* mit der Erleichterung durch die Teilebereitstellung des zweiten Roboters. Zudem geben sie an, dass die empfundene Beanspruchung der Körperhaltung in *K3* und *K1* stärker abnimmt als in *K2* (vgl. Abb. 6.22). Als Ursache wird die angenehmere Montagehöhe auf dem Roboterflansch genannt.

### **Haltung des Rückens**

Der in den Kommentaren häufig genannte Wunsch nach einer individuellen Anpassung der Montagehöhe kann anhand der Beobachtung von ungünstiger Körperhaltung von kleinen sowie größeren Probanden während des Versuchs nachvollzogen werden. Aufgrund dessen wird der Einfluss der Rückenhaltung auf den Belastungsindex detailliert betrachtet. Dazu werden die Probanden in vier Kategorien eingeteilt (*klein*, *normal*, *groß* und *überdurchschnittlich groß*) und jeweils ein Proband je Gruppe den Anderen gegenübergestellt. Die Größe des Probanden leitet sich aus den Quartilen ab, womit die Kategorie klein dem unteren Quartil, normal dem Median, groß dem dritten Quartil und überdurchschnittlich groß dem Maximum entspricht. Zwischen den Kategorien zeigen sich deutliche Unterschiede in der Körperhaltung. In Abbildung Abb. 6.25 werden die Anteile der vier Aktionskategorien des Rückens im Logistikkonzept in Abhängigkeit der Zeit (30 Sekundenintervall) dargestellt. Die Analysen der anderen Konzepte

befinden sich im Anhang (siehe Abb. A.3). Es zeigt sich ein deutlicher Effekt durch das Fehlen der Montageunterstützung bei überdurchschnittlichen großen sowie großen Probanden. Der Einsatz des Roboters in *K1* und *K3* mindert den Effekt, kann diesen bei überdurchschnittlich großen Probanden jedoch nicht vollständig beseitigen (vgl. Abb. A.3). Die Erleichterung der Montage wird auch subjektiv wahrgenommen und durch die Probanden in der Evaluation der Körperhaltung positiv gewertet (vgl. Abb. 6.22). Zudem ist zu beachten, dass die Erhöhung des Montageanteils durch den Roboter (*K1* und *K3*) bei Probanden der Kategorie klein zu höheren Belastungen führt (vgl. Abb. A.3). Der Effekt von Körpergröße und Montagekonzept auf die Haltung des Rückens der Probanden ist aus den Daten ersichtlich. Da alle Probanden (unabhängig von ihrer Größe) den kompletten Versuch durchlaufen haben, ist davon auszugehen, dass sich der Effekt der Körpergröße in gleicher Weise auf die Indices der Montagevarianten auswirkt und die Vergleichbarkeit gegeben ist.

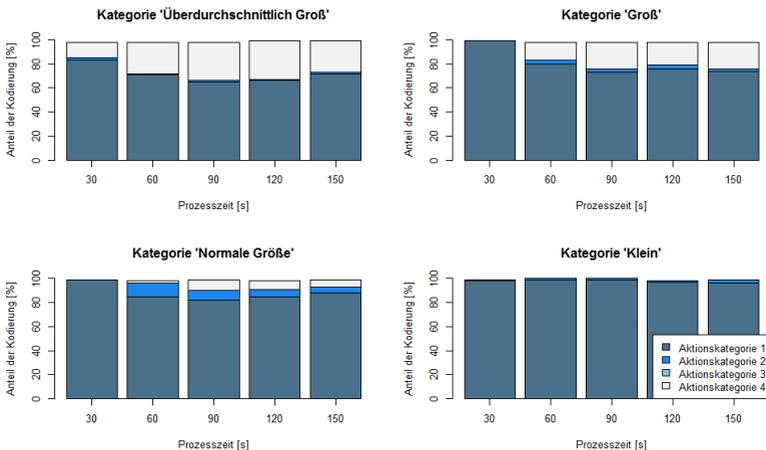


Abb. 6.25: Übersicht über die zeitlichen Anteile (Intervall 30 Sekunden) der Aktionskategorien des Rückens in den vier Kategorien überdurchschnittlich groß, groß, normal und klein im Logistikkonzept (*K2*).

In diesem Zusammenhang stellt die individuelle Anpassung der Montagehöhe an den Probanden eine Lösung dar. Diese kann im Rahmen des ATL-Handlings mit dem Roboter über eine Abfrage der Körpergröße erfolgen.

### **Haltung der Arme**

Ein kritischer Aspekt der Datenanalyse zur Körperhaltung ist der signifikante Unterschied des Belastungsindex in Abhängigkeit der Robotersteuerung. Dieser ist weder aus dem Versuchsaufbau, noch aus der zeitabhängigen Datenanalyse ersichtlich. Auch die Analyse des Konzepts *K3*, das eine Signifikanz aufweist, zeigt keine spezifischen Abweichungen der beiden Steuerungsvarianten (vgl. Abb. 6.24). Ursache der Differenz kann das Heben des rechten Arms zur Darstellung der Gesten sein. Dem gegenüber steht der relativ kleine Zeitrahmen, in dem die Steuerung des Roboters stattfindet, wodurch das Gesamtergebnis nur in geringer Weise beeinflusst werden kann. Für eine genauere Analyse der Armhaltung wird die gleiche Kategorisierung wie bei der Untersuchung der Rückenhaltung angewandt. Aus dieser ist keine Differenzierung ersichtlich, die auf die Robotersteuerung zurückzuführen ist. Abbildung Abb. 6.26 zeigt dies beispielhaft anhand des prozentualen Anteils der Aktionskategorien 1-3 in Abhängigkeit der Zeit in Konzept *K3<sub>B/G</sub>*. Sowohl bei Benutzung der Gesten-, als auch der Buzzersteuerung tritt maximal Kategorie 2 auf, die sich bei kleineren Probanden am deutlichsten zeigt. In Kategorie überdurchschnittlich groß und groß bestehen Unterschiede zwischen den Steuerungsarten, diese sind jedoch nicht von ausschlaggebender Größe. Ein Einfluss der Robotersteuerung auf die Armhaltung kann deshalb nicht nachgewiesen werden.

Aus der Analyse der Daten geht hervor, dass die Integration des Roboters in den Montageprozess eine Verbesserung der Körperhaltung bewirkt. Weitere Potentiale zur Verbesserung des Versuchsaufbaus bestehen in der Integration einer adaptiven Montagehöhe durch einen höhenverstellbaren Tisch oder über den Roboter. Kritisch zu hinterfragen sind Ergebnisse des verwendeten

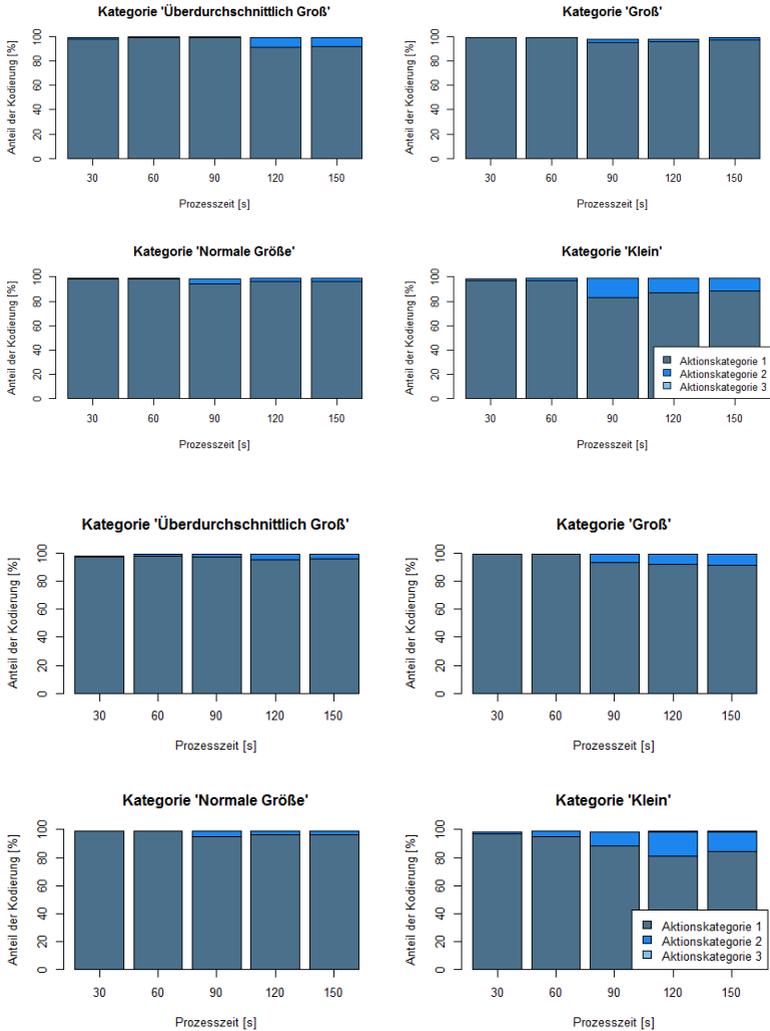


Abb. 6.26: Zeitlicher Anteil der OWAS-Aktionskategorien in Bezug auf die Armhaltung in Abhängigkeit der Probandenkategorie überdurchschnittlich groß, groß, normal und klein des Kombikonzept ( $K_3$ ) im 30 Sek. Intervall, Robotersteuerung Buzzer (oben), Gestensteuerung (unten).

Messverfahrens zur objektiven Datenanalyse. Aufgrund der Tatsache, dass zwischen den einzelnen Konzepten sehr geringe Unterschiede bestehen und für den Faktor Robotersteuerung keine eindeutige Bestätigung der signifikanten Differenz ermittelt werden konnte, wäre die Nutzung eines genaueren Messverfahrens (bspw. RULA-Verfahren) ein Ansatz. Die Bestätigung der Ergebnisse durch die subjektiven Daten sowie die Lokalisierung der Ursachen für die Differenzen innerhalb der zeitabhängigen Daten bestärkt die Wahl der Messmethode. Zudem zeigt letztere im Rahmen der Datenanalyse die Fähigkeit, geringe prozessbedingte Unterschiede der Körperhaltung zu messen, was in Bezug auf den Robotereinsatz sowie die Zielsetzung des Experiments erwartet wurde.

## **6.4 Einfluss der Schnittstelle auf die Prozessinteraktion**

Der Probandenversuch zur Evaluation der Prozessgestaltung zeigt die Effekte einer MRI auf den Montageprozess und deren Abhängigkeit von Montagekonzept sowie Robotersteuerung. In diesem Zusammenhang werden Vorteile und Nachteile der Gestaltung von Prozess und Schnittstelle deutlich gemacht. Im Besonderen zeigt sich dies in der Diskrepanz zwischen den erwarteten und den experimentell ermittelten Werten des Logistikkonzepts sowie der Gestensteuerung. Die Zielsetzung des folgenden Versuchs ist die vollständige Untersuchung des Faktors Robotersteuerung, der im Rahmen des vorherigen Experiments aufgrund des Umfangs sowie der Fokussierung auf die Montagekonzepte eingeschränkt wurde. Der Fokus liegt auf der Betrachtung des Interaktionsflusses und somit auf der Analyse der Prozesszeit. Neben der Robotersteuerung stellen die hinsichtlich des Prozessablaufs optimierten Montagekonzepte den zweiten Einflussfaktor dar. Die Ergonomie wird nicht weiter betrachtet, da die Änderungen an den Montagekonzepten nicht weitreichend genug sind, um einen messbaren Effekt hervorrufen zu können. Die quantitative Zielgröße des Versuchs ist die Prozesszeit.

### **6.4.1 Methodik**

Dieser Abschnitt erläutert die Änderungen in Vorgehensweise und Aufbau des Versuchs im Vergleich zum Vorversuch. Das experimentelle Design wird auf den Faktor Robotersteuerung ausgerichtet und der Aufbau den Erkenntnissen des ersten Versuchs entsprechend angepasst. Detaillierte Angaben folgen in den Unterkapiteln Versuchsplanung, -aufbau und -durchführung.

#### **6.4.1.1 Versuchsplanung**

Das experimentelle Design orientiert sich an dem des vorhergehenden Versuchs. Da der Fokus auf der Untersuchung des Einflusses der Robotersteuerung liegt, werden die drei Faktorstufen integriert und der Faktor Monta-

gekonzepte um eine Stufe reduziert. Das Logistikkonzept, dessen Eigenschaften das Kombikonzept integriert und gegenüber den anderen Varianten sowohl objektiv als auch subjektiv schlechter abschließt, wird im Rahmen dieses Versuchs nicht weiter betrachtet. Handlings- und Kombikonzept werden entsprechend der beobachteten Optimierungspotentiale modifiziert. Die Änderungen am Prozess dienen einem flüssigeren Ablauf, indem die Robotertergeschwindigkeit erhöht, Wartezeiten verkürzt und Montagezeiten auf die realen Werte angepasst werden. Zudem wird der Abstand zwischen dem Bereitstellungsregal und dem Arbeitsplatz erhöht, um den Realitätsbezug über längere Laufwege zu erhöhen. Es ist zu erwarten, dass sich dies vorteilhaft auf die automatisierte Bereitstellung auswirkt. Der Faktor Robotersteuerung wird um die Sprachsteuerung erweitert und der Umfang des Gestensets aufgrund der Probleme mit Zuordnung und Darstellung im Vorversuch auf eine Geste reduziert. Es wird erwartet, dass sich die Vergleichbarkeit zur Steuerung per Sprache und per Buzzer dadurch verbessert. Auf eine detaillierte Untersuchung des Faktors Informationsmodule wird im Rahmen des Experiments verzichtet. Zum einen, da im Vorversuch kein signifikanter Unterschied erkennbar war und zum anderen, da der Aufwand einer detaillierten Untersuchung den zur Verfügung stehenden Zeitrahmen überziehen würde. Die Informationsmodule werden gleichmäßig auf die Durchläufe verteilt. Der vollfaktorielle Versuchsplan für die Faktoren Robotersteuerung und Montagekonzept, der in Tabelle 6.19 abgebildet ist, ergibt eine Anzahl von sieben Durchläufen je Proband. Aus den Erkenntnissen des Vorversuchs bedeutet dies eine ungefähre Dauer von 2.5 Stunden. Da zwischen den Konzepten keine Umrüstvorgänge anfallen, wird die Reihenfolge frei variiert, um eine gleichmäßige Verteilung zu erreichen. Eine Abdeckung aller möglichen Abfolgen ist aufgrund der Vielzahl nicht möglich, weshalb darauf geachtet wird, dass jedes Konzept gleichmäßig verteilt ist. Die feste Positionierung des manuellen Referenzprozesses zu Beginn und Ende des Versuchs wird gegenüber einer variablen Position gewechselt.

Tab. 6.19: *Versuchsplan des Probandenexperiments zur Untersuchung des Einflusses der Faktoren optimiertes Montagekonzept und Robotersteuerung auf die Zielgröße Prozesszeit*

Robotersteuerung	Montagekonzept		Anz. Probanden
Buzzer	$K1_{opt}$	$K3_{opt}$	8
Geste	$K1_{opt}$	$K3_{opt}$	8
Sprache	$K1_{opt}$	$K3_{opt}$	8
Anz. Probanden	8	8	

#### 6.4.1.2 Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt werden die Änderungen des experimentellen Aufbaus im Vergleich zum Vorversuch erläutert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich Änderungspotentiale bzgl. des experimentellen Aufbaus zur Minderung des Einflusses auf die Prozesszeit. Neben diesen werden die relevanten Messwerkzeuge und die Modifizierungen der Robotersteuerung sowie die inhaltlichen Anpassungen des Fragebogens vorgestellt.

#### Interaktionsarbeitsplatz

Da die Einschränkungen des Laborumfelds bestehen bleiben und der Aufbau mit einer Fläche von  $17 \text{ m}^2$  bzgl. der Bereitstellungsfläche nicht erweitert werden kann, wird der Versuch ebenfalls mit einer ATL Variante durchgeführt. Für das Experiment wird der im Vorversuch konzipierte IAP mit einer Änderung wiederverwendet. Diese besteht in der Erhöhung der Distanz von Arbeitsplatz zu Bereitstellungsregal von  $0.8 \text{ m}$  auf  $2.1 \text{ m}$  (vgl. Abb. 6.27). Für die detaillierte Beschreibung des Aufbaus wird auf Abschnitt 6.3.1.2 verwiesen.

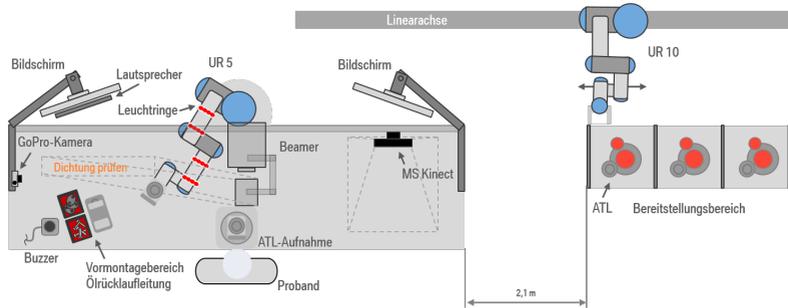


Abb. 6.27: Schematische Übersicht über den modifizierten Aufbau des Interaktionsarbeitsplatzes im Rahmen der Untersuchung des Einfluss der Mensch-Roboter-Schnittstelle auf die Prozessinteraktion (Angabe der Distanz zwischen Arbeitsplatz und Bereitstellungsgebiet nicht maßstabsgetreu).

### Robotersteuerung

Zur Steuerung des Roboters stehen dem Probanden Buzzer, Geste und Sprache zur Verfügung. Der Buzzer bleibt in seiner Funktionsweise unverändert bestehen. Das bestehende Gestenset wird auf *Flat Palm*-Geste angepasst, die für alle Anweisungen genutzt wird. Die Reduktion auf eine Geste dient der Verringerung der Varianten und damit der besseren Vergleichbarkeit der Steuerungen. Zur Eingabe der Sprachanweisung wird das mobile Headset *Jabra Pro 920 Duo* verwendet. Das System entspricht der in Abschnitt 4.1.1.2 konzipierten hybriden Spracherkennung, die sowohl eine Sprach- als auch eine Intentionserkennung bietet. Das Schlüsselwort zur Aktivierung ist *Robot*, zur Anweisung des Roboters werden in Abhängigkeit des Montagekonzepts vier bzw. fünf Befehle genutzt. Für die Anweisung den ATL zu bringen, wird in  $K3_{opt}$  sinngemäß die Wortfamilie für etwas holen herangezogen. Der Proband kann bspw. *get the turbocharger* oder *bring me the turbocharger* nutzen, um diesen zu erhalten. Für die Scanvorgänge werden Worte wie *scan* oder *check* genutzt, für die Drehung des Roboters entsprechend Worte wie *rotate* oder *turn*. Die Anweisungen in englischer Sprache sind dadurch bedingt, dass das deutsche Sprachpaket von *Nuance Mix* zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht im gewünschten Umfang zur

Verfügung stand (vgl. Kap. 5.1). Die sicherheitstechnische Begrenzung der Steuerung des Roboters mit Kopplung an den Prozessablauf bleibt bestehen. Somit besteht keine Möglichkeit der Wiederholung oder des Überspringens eines Prozessschritts. Wie im vorigen Versuch kann der Proband den nächsten Montageschritt in einer linearen Abfolge über eine Anweisung einleiten.

### **Messwerkzeuge**

Die Messung der Zielgröße Prozesszeit erfolgt über das Kamerasystem Go-Pro Hero 3+. Dieses ist auf der linken Seite des Überbaus am IAP montiert (vgl. Abb. 6.27). Das Blickfeld wird justiert, um sowohl den Montagebereich, als auch das Bereitstellungsregal in der neuen Position zu erfassen.

### **Fragebogen**

Die subjektive Datenerhebung erfolgt über einen Fragebogen. Dieser ist an den des Vorversuchs angelehnt und entsprechend auf die drei Steuerungskonzepte sowie die modifizierten Montagekonzepte angepasst. Ziel ist es, zum einen die subjektive Wahrnehmung der Probanden bezüglich des Effekts der Einflussfaktoren zu erfassen und zum anderen wahrgenommene Veränderungen im Vergleich zum vorhergehenden Versuch festzustellen. Da sich der Einsatz der Informationsmodule nicht ändert, wird auf den entsprechenden Fragenblock verzichtet. Die Themenbereiche zu MRI und Robotersteuerung sowie der ergonomischen Beanspruchung bleiben bestehen. Den Abschluss bildet ein offener Kommentar für Anmerkungen der Probanden. Der vollständige Fragebogen befindet sich im Anhang (Abb. A.7).

### **Stichprobe**

Um eine detaillierte Analyse der Montagekonzepte, deren Modifikationen sowie der Robotersteuerung zu ermöglichen, wird in diesem Versuch auf Probanden mit Erfahrung in der ATL-Montage zurückgegriffen. Der Übungseffekt sollte sich deshalb nur gering auswirken. Die Auswahl der homogenen Probandengruppe erstreckt sich von Studenten mit Fachbezug bis zu Ange-

stellten der BMW AG mit Fertigungsbezug. Auf die Teilnahme von Werkern aus der Motorenmontage wird aus Vergleichsgründen verzichtet. Insgesamt nehmen N=8 Probanden teil, die ausschließlich männlichen Geschlechts sind. Die geringere Anzahl an Probanden bedingt sich durch deren Erfahrung hinsichtlich der ATL-Montage. Bei der Datenerfassung traten keine Fehler auf, weshalb alle erhobenen Daten in der Analyse Verwendung finden.

#### **6.4.1.3 Versuchsdurchführung**

Die Versuchsdurchführung gleicht der der vorherigen Untersuchung, wobei die Einführung in die ATL-Montage aufgrund der Vorkenntnisse der Probanden entfällt. Diese durchlaufen eine Übungs-, Versuchs- sowie Feedbackphase. Die Übungsphase besteht aus einer zweimaligen Montage des ATLS, um dem Probanden die einzelnen Schritte wieder in Erinnerung zu rufen. Direkt im Anschluss absolviert der Proband die im Versuchsplan definierte Abfolge an Konzepten. Vor jedem Durchlauf wird der Proband über die Art des Konzepts und die verwendete Robotersteuerung aufgeklärt. Nach dem Experiment füllt der Proband den Fragebogen aus, dabei steht der Versuchsleiter bei Fragen und Anregungen zur Verfügung.

## 6.4.2 Ergebnis

In diesem Abschnitt wird auf die Ergebnisse des Versuchs eingegangen. Zu Beginn werden die objektiven Daten der Zielgröße Prozesszeit vorgestellt. Die statistische Datenauswertung erfolgt anhand der Programmiersprache *R* (Version 3.4.1) in der Umgebung *RStudio*. Die Analyse der subjektiven Daten aus dem Fragebogen, über die ein Vergleich zum vorherigen Versuch gezogen wird, schließen das Unterkapitel ab.

### 6.4.2.1 Prozesszeit

Aufgrund der verletzten Normalverteilungsannahme werden die messwiederholten Daten über den Friedman-Test ausgewertet. Es werden die Varianten des Einflussfaktors Montagekonzept ( $K0$ ,  $K1_{opt}$ ,  $K3_{opt}$ ), die der Robotersteuerung (Buzzersteuerung, Gestensteuerung, Sprachsteuerung) sowie deren Interaktion untersucht. Die Betrachtung des manuellen Referenzkonzepts  $K0$  entfällt bei der Evaluation des Faktors Robotersteuerung. Diese dient als Vergleichswert für die roboterunterstützten Montagekonzepte. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 6.20 dargestellt.

Tab. 6.20: Testergebnisse der Prozesszeitdaten unter dem Einfluss der Faktoren Montagekonzept und Robotersteuerung mittels des Friedman-Tests ( $N=8$ ). Angegeben sind der  $\chi^2$ -Wert, die Freiheitsgrade sowie die Wahrscheinlichkeit ( $p$ -Wert)

Effekt	$\chi^2$	$df$	$p$
Montagekonzept	2.3	2	.34
Steuerung	7.2	2	<.05
Montagekonzept x Steuerung	5.6	5	.35

### Haupteffekt Montagekonzept

Die Betrachtung der Mittelwerte legt bereits nahe ( $MW_{K0} = 124.0s, MW_{K1opt} = 120.6s, MW_{K3opt} = 121.5s$ ), dass die Probanden unabhängig von der Montagevariante ähnliche Zeiten erreichen (siehe Abb. 6.28). Eine Differenz der Prozesszeiten in Abhängigkeit der Konzeptvarianten kann statistisch nicht nachgewiesen werden ( $\chi^2 = 2.3, p = .34, df = 2$ ). Die Montagezeit der geübten Probanden unterscheidet sich nicht durch die Art des Montagekonzepts.

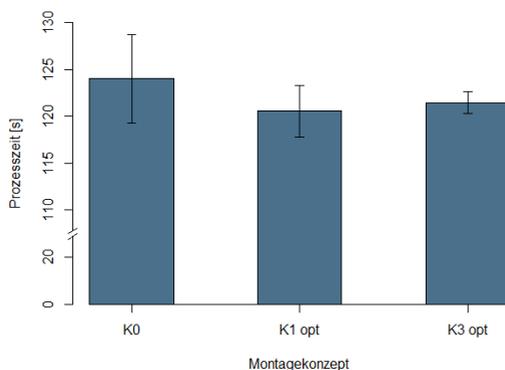


Abb. 6.28: Prozesszeit in Abhängigkeit der Montagekonzeptvarianten manuelles Referenzkonzept ( $K0$ ), optimiertes Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ) ( $N=8$ ). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwertes der abhängigen Stichproben.

### Haupteffekt Robotersteuerung

Die Mittelwerte des Faktors Robotersteuerung weisen größere Differenzen bzgl. der Prozesszeit auf (siehe Tabelle 6.21 und Abb. 6.29). Diese wird nach dem Friedman-Test signifikant ( $\chi^2 = 7.2, p = .27, df = 2$ ), womit die Verwendung der Robotersteuerung über die resultierende Montagezeit entscheidet. Der paarweise Vergleich der Steuerungen mittels des zweiseitigen Wilcoxon-Tests ergibt im Vergleich der Buzzer- mit der Gestensteuerung

einen signifikanten Unterschied. Ein einseitiger Test zeigt, dass die Verwendung des Buzzers schnellere Montagezeiten bedingt. Die Differenz zwischen Buzzer- bzw. Gesten- und Sprachsteuerung ist nicht signifikant.

Tab. 6.21: *Post-Hoc Vergleich des Faktors Robotersteuerung über zweiseitigen Wilcoxon Test mit Bonferroni korrigiertem p-Wert*

RS <sub>1</sub>	RS <sub>2</sub>	MW <sub>B</sub>	MW <sub>G</sub>	M <sub>B</sub>	M <sub>G</sub>	V	df	p
B	G	117.2	124.4	118.2	124.2	3	1	.004
B	S	117.2	121.4	118.2	121.4	24.5	1	.27
G	S	124.4	121.4	124.2	121.4	62	1	.07

*Anmerkung.* Der Bonferroni korrigierte  $p$ -Wert liegt bei  $p=.008$ , aufgeführt sind Robotersteuerung (RS), Mittelwert (MW), Median (M), Teststatistik (V) und Anzahl der Freiheitsgrade (df) für die Steuerung per Geste (G), Buzzer (B) und Sprache (S).

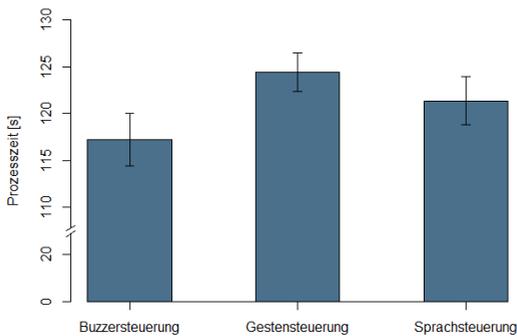


Abb. 6.29: Prozesszeit in Abhängigkeit der Varianten des Faktors Robotersteuerung (N=8). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwertes der abhängigen Stichproben.

### Interaktion Montagekonzept und Steuerung

Die Interaktion der beiden Effekte hat, ebenso wie die Einzelbetrachtungen, keine statistisch nachweisbare Auswirkung auf die Prozesszeit ( $\chi^2 = 7.2, p = .27, df = 5$ ). Trotzdem liegen, wie in Abbildung Abb. 6.30 zu sehen, zwischen den Mittelwerten der Montagevarianten teilweise deutliche Differenzen vor ( $MW_{K1Bopt}=115.2s, MW_{K1Gopt}=124.0s, MW_{K1Sopt} = 122.5s, MW_{K3Bopt} = 119.3s, MW_{K3Gopt} = 124.8s, MW_{K3Sopt} = 120.2s$ ).

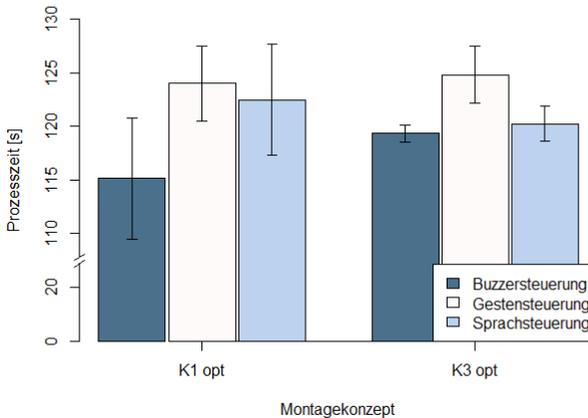


Abb. 6.30: Prozesszeit in Abhängigkeit der Faktorstufen von Robotersteuerung und Montagekonzept ( $K1_{opt}$ =optimiertes Handlingskonzept,  $K3_{opt}$ =opt. Kombikonzept) ( $N=8$ ). Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Standardfehler des Mittelwertes der abhängigen Stichproben.

### 6.4.2.2 Vergleich der experimentell ermittelten Prozesszeiten mit den MTM-Zeitwerten

Der Vergleich der gemessenen Prozesszeiten mit den theoretisch ermittelten MTM-Werten, der in Tabelle 6.22 gezeigt wird, weist einen signifikanten Einfluss der Robotersteuerung auf. Den optimierten Montagekonzepten kann statistisch kein Effekt nachgewiesen werden. Die Prozesszeiten zeigen, dass die Montagevarianten mit Buzzer und Sprachsteuerung die Zeiten des manuellen Referenzkonzepts unterbieten. Die mit Gestensteuerung liegenden auf einem gleichen Niveau. Die Erwartung an eine Zeitersparnis durch die MRI ist somit gegeben. Die Gegenüberstellung der gemessenen Zeiten mit den der MTM-Analyse weisen eine Differenz auf, die mit einer durchschnittlichen Abweichung von 21.8% jedoch um mehr als 50% kleiner ausfällt als im vorherigen Versuch.

Tab. 6.22: Vergleich der theoretisch ermittelten MTM-Zeitwerte [s] und der experimentell gemessenen Prozesszeit [s]

	<i>K0</i>	<i>K1<sub>Bopt</sub></i>	<i>K1<sub>Gopt</sub></i>	<i>K1<sub>Sopt</sub></i>	<i>K3<sub>Bopt</sub></i>	<i>K3<sub>Gopt</sub></i>	<i>K3<sub>Sopt</sub></i>
MTM	125.8	108.7	105.1	86.4	105.4	100.9	83.1
<i>M</i>	124.5	110.2	123.5	121.5	118.8	125.2	121.5
<i>MW</i>	124.0	115.2	124.0	122.5	119.3	124.8	120.3
<i>Min</i>	111.0	101.0	113.5	105.5	118.0	116.5	115.0
<i>Max</i>	136.0	139.0	139.0	141.0	123.0	134.0	124.5

*Anmerkung.* Aufgeführt sind Median (*M*), Mittelwert (*MW*), Minimum (*Min*) und Maximum (*Max*) für die Zeitwerte der Montagekonzepte Referenzkonzept (*K0*), opt. Handlingskonzept (*K1<sub>opt</sub>*) und opt. Kombikonzept (*K3<sub>opt</sub>*) in Kombination mit der Robotersteuerung per Buzzer (B), Geste (G) oder Sprache (S).

### 6.4.2.3 Analyse der Zeitanteile und des Interaktionsfluss

Die entsprechend der Systematik der Prozessinteraktionsanalyse differenzierten Prozesszeitanteile werden in Abbildung Abb. 6.31 dargestellt. Diese zeigt die Verteilung von von AZM zu IZM, AZR zu IZR und ZDI zu ZII in Abhängigkeit der jeweiligen Montagevariante. Durch die vorgenommenen Optimierungen steigt die AZR in  $K3_{\text{opt}}$  auf 100% und die IZM in  $K1_{\text{opt}}$  sinkt deutlich. Der starke Einfluss der Sprachsteuerung auf das Verhältnis der Zeitanteile zeigt sich in Abbildung Abb. 6.31 ebenfalls. Die zugehörigen Kennwerte listet Tabelle 6.23 auf. Darin zeigt sich der Effekt der Sprachsteuerung auf das Verhältnis von AZM zu IZM sowie von ZDI zu ZII, da der ZDI stark reduziert wird.

Tab. 6.23: Durchschnittliche Zeitanteile von Mensch und Roboter entsprechend der Prozessinteraktionssystematik

	$K1_{\text{Bopt}}$	$K1_{\text{Gopt}}$	$K1_{\text{Sopt}}$	$K3_{\text{Bopt}}$	$K3_{\text{Gopt}}$	$K3_{\text{Sopt}}$
<b>AZM</b>	114.0	123.1	119.1	101.8	113.2	93.8
<b>IZM</b>	1.2	0.9	3.4	17.5	11.6	26.6
<b>AZR</b>	22.1	22.1	22.1	119.3	124.8	120.3
<b>IZR</b>	93.1	101.9	100.4	0.0	0.0	0.0
<b>% IZM</b>	1.0	0.7	2.8	14.7	9.3	22.1
<b>% IZR</b>	80.8	82.2	82.0	0.0	0.0	0.0
<b>GZA</b>	20.9	21.2	18.7	101.8	113.2	93.8
<b>% GZA</b>	18.2	17.1	15.2	85.3	90.7	77.9
<b>ZDI</b>	4.5	12.0	1.7	22.1	28.7	16.3
<b>ZII</b>	16.4	9.2	17.0	79.7	84.5	77.4
<b>PVZ</b>	1.2	0.9	3.4	17.5	11.6	26.6

*Anmerkung.* Aufgeführt sind opt. Handlingskonzept ( $K1_{\text{opt}}$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{\text{opt}}$ ) mit Robotersteuerung per Buzzer (B), Geste (G) oder Sprache (S), sowie Aktive Zeit des Menschen (AZM), Inaktive Zeit des Menschen (IZM), Aktive Zeit des Roboters (AZR), Inaktive Zeit des Roboters (IZR), Gleichzeitige Aktivität (GZA), Zeit direkter Interaktion (ZDI), Zeit indirekter Interaktion (ZII) und Prozessverzögernder Zeitanteil (PVZ).

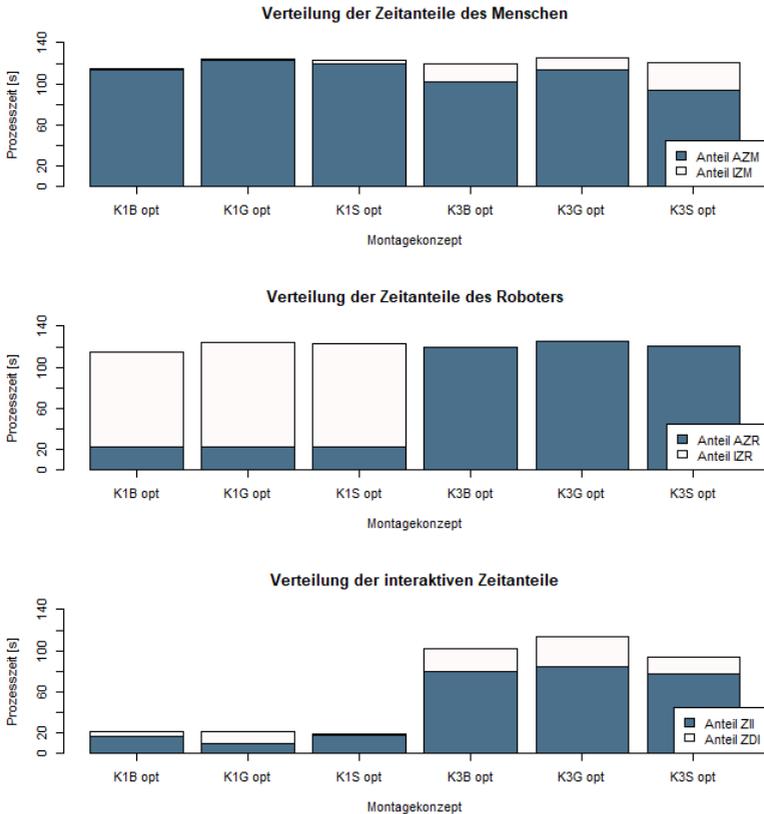


Abb. 6.31: Verteilung der Zeitanteile von Aktive Zeit des Menschen (AZM) und Inaktive Zeit des Menschen (IZM), Aktive Zeit des Roboters (AZR) und Inaktive Zeit des Roboters (IZR) sowie Zeit direkter Interaktion (ZDI) und Zeit indirekter Interaktion (ZII) in Abhängigkeit der optimierten Montagekonzepte Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) und Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ) sowie der Robotersteuerung per Buzzer (B), Geste (G) oder Sprache (S) über die Prozesszeit auf Basis von Durchschnittswerten.

### 6.4.2.4 Subjektive Wahrnehmung

Die erhobenen Daten dienen dem Vergleich zu den objektiven Messgrößen dieses Versuchs sowie zu den des vorhergehenden Experiments. Die Themenbereiche bilden die Wahrnehmung zu Montageprozess, MRS und Ergonomie ab.

#### Montageprozess

Abbildung Abb. 6.32 zeigt die Bewertung der Robotersteuerung bezogen auf ihr Verhalten im Prozess. Dies beinhaltet sowohl die Evaluation der drei Schnittstellen dieses, als auch die Ergebnisse des Vorversuchs. In Bezug auf die Gestensteuerung zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Diese verbessert sich von einem *eher guten* auf ein *gutes* Niveau.

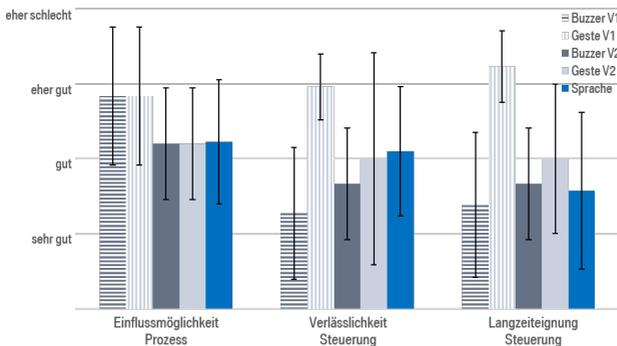


Abb. 6.32: Subjektive Bewertung und Vergleich der Prozesssteuerung über die Varianten der Robotersteuerung in Vor- (V1) und Zweitversuch (V2). Angegeben sind Mittelwert und zugehörige Standardabweichung.

Während die Streuung der Evaluation des Buzzers in den drei Kategorien ähnlich ausfällt, steigt die der Gestensteuerung trotz des besseren Mittelwertes deutlich gegenüber dem Level des Vorversuchs an (vgl. Abb. 6.32). Die Steuerung per Buzzer verschlechtert sich leicht, bleibt aber auf gleichem Niveau. Die Sprachsteuerung wird mit geringer Differenz zum einen zur un-

zuverlässigsten Steuerung und zum anderen zu der Steuerung mit der besten Langzeiteignung bewertet. Die Betrachtung der Wahrnehmung von Arbeitsaufteilung und prozessualer Partnerschaft zeigt mit kleinen Abweichungen das gleiche Bild wie im Vorversuch (vgl. Abb. 6.33). Die Änderungen in den Montagekonzepten werden von den Probanden in allen Kategorien nicht als deutlich wahrgenommen.

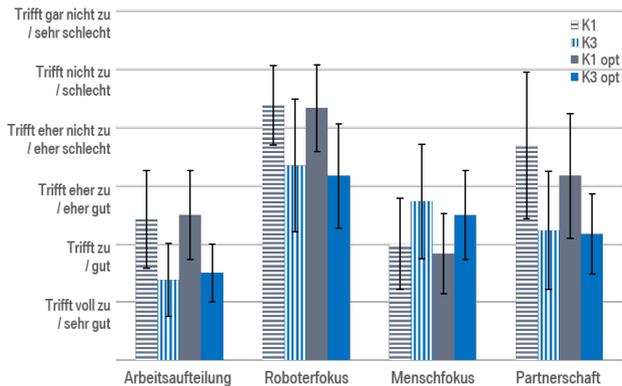


Abb. 6.33: Subjektive Wahrnehmung der Arbeitsaufteilung und -gestaltung zwischen Mensch und Roboter in Handlings- ( $K1$ ) und optimiertem Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) sowie Kombi- ( $K3$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ). Angegeben sind Mittelwert und zugehörige Standardabweichung.

Ähnlich verhält sich die Bewertung der Robotertätigkeit. Das Bewertungsniveau beider Versuche liegt mit kleinen Differenzen nahezu gleichauf (vgl. Abb. 6.34). Bei  $K1$  bzw.  $K1_{opt}$  besteht nach Aussage der Probanden immer noch der Bedarf nach einer Erhöhung der Tätigkeit des Roboters. Bei  $K3_{opt}$  wurde einstimmig das richtige Verhältnis getroffen. Die Einschätzungen des Anteils der Robotertätigkeit verringern sich in diesem Versuch leicht, bleiben aber auf gleichem Niveau bestehen.

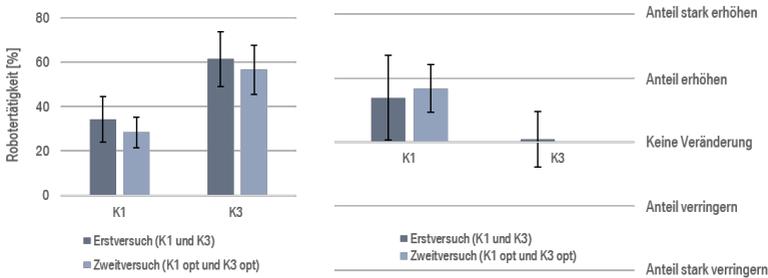


Abb. 6.34: Wahrnehmung des Anteils der Robotertätigkeit in den einzelnen Montagekonzepten (links); Subjektive Empfehlung der Probanden zur Anpassung der Robotertätigkeit in Abhängigkeit der Montagekonzepte  $K1 / K1_{opt}$  und  $K3 / K3_{opt}$  (rechts). Angegeben sind Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

Die subjektive Bewertung der Kollaboration von  $K1 / K1_{opt}$  sowie  $K3 / K3_{opt}$  fällt eindeutig aus als im ersten Versuch und zeigt einen im Vergleich ähnlichen Verlauf mit negativer Tendenz (vgl. Abb. 6.35). Im Besonderen werden Zuverlässigkeit und flüssige Teamarbeit in  $K3_{opt}$  teilweise deutlich negativer bewertet als in  $K3$ . Bei  $K1$  und  $K1_{opt}$  liegt eine ähnliche, jedoch nicht so stark ausgeprägte, Wahrnehmung vor. Lediglich die Bewertung der Informationsmodule weicht davon ab. Die Informationsmodule werden in den beiden optimierten Konzepten negativer wahrgenommen als in jenen des vorherigen Versuchs.

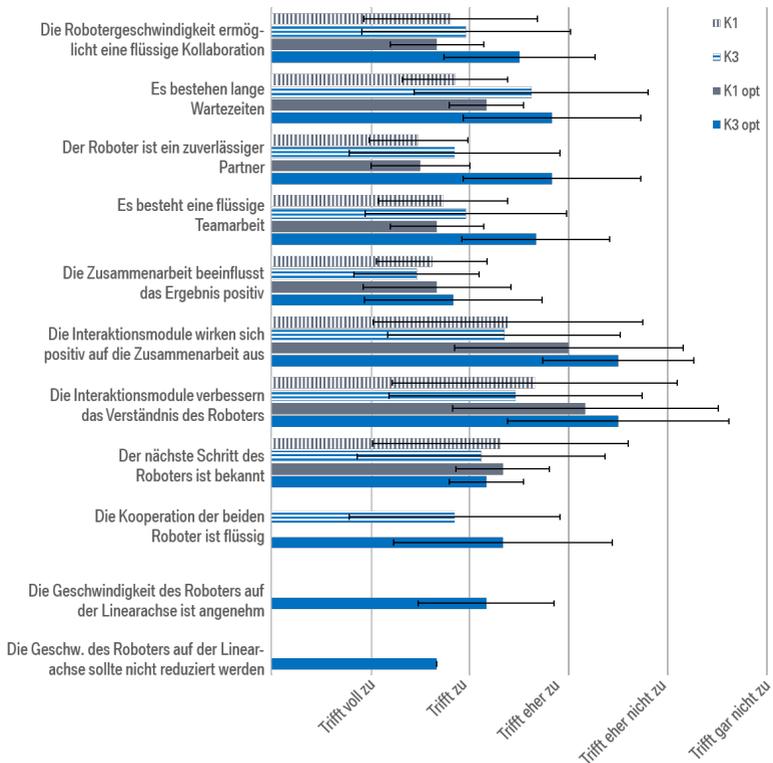


Abb. 6.35: Subjektive Bewertung der Kollaboration der Probanden mit dem/den Roboter/n in den Montagekonzepten Handlings- ( $K1$ ) und optimiertes Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) sowie Kombi- ( $K3$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ). Angegeben sind Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

Der Vergleich der Robotersteuerungsvarianten anhand von Gebrauchstauglichkeitskriterien ergibt einen Vorteil der Buzzersteuerung gegenüber den anderen Varianten, der bei Betrachtung der Streuung des Ergebnis sehr eindeutig ausfällt ( $MW_{SD\_Buzzer} = 0.37$ ,  $MW_{SD\_Geste} = 1.06$ ,  $MW_{SD\_Sprache} = 0.63$ ). Am deutlichsten zeigt sich dies bei *fehlerfreier Bedienung*, *Zuverlässigkeit* und *Reaktionszeit*, die eine Differenz von mehr als einer Bewertungseinheit aufweisen (vgl. Abb. 6.36). Bei *flüssiger Zusammenarbeit*, *positiv*

ver Wirkung auf das Gesamtergebnis und angenehmer Bedienung wird die Sprachsteuerung als gleichwertig empfunden und weist bzgl. der positiven Wirkung eine geringere Streuung als der Buzzer auf ( $SD_{\text{pos. Wirkung}_B} = 0.65, SD_{\text{pos. Wirkung}_S} = 0.48$ ). Die Steuerung per Geste kommt in keinem Kriterium in einen ähnlichen Bewertungsbereich und liegt insgesamt auf einem befriedigenden Niveau (vgl. Abb. 6.36). Die negativsten Bewertungen erhalten fehlerfreie Bedienung, intuitive Bedienbarkeit und flüssige Zusammenarbeit, wobei letztere die stärkste Streuung im Vergleichsfeld aufweist ( $SD_{\text{fl. Zusammenarbeit}_G} = 1.41$ ).

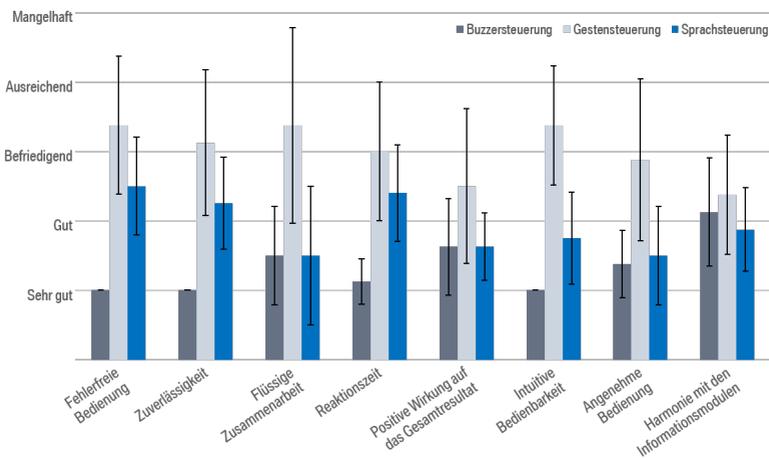


Abb. 6.36: Subjektive Bewertung der Robotersteuerung per Buzzer, Geste und Sprache anhand von Kriterien der Gebrauchstauglichkeit. Abgegeben ist der jeweilige Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

Die Betrachtung der Benutzbarkeit der Steuerschnittstellen anhand von Stressniveau und Ergonomie in Abbildung Abb. 6.37 zeigt eine klare Bevorzugung der Sprachsteuerung. Diese wird in beiden Kategorien deutlich besser bewertet als die beiden Alternativen. Zudem weist sie die geringste Streuung innerhalb des Vergleichs auf. Die Steuerung per Buzzer liegt auf einem sehr guten bis guten Niveau und die Steuerung per Geste schneidet in

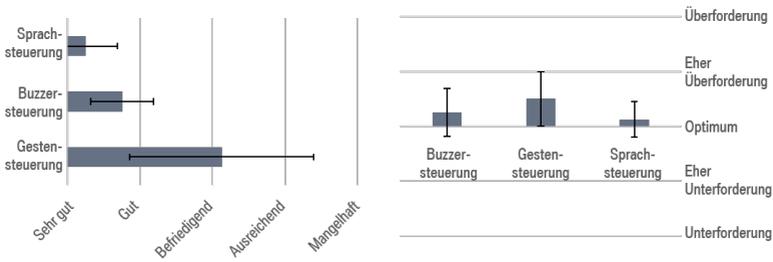


Abb. 6.37: Subjektive Bewertung der Robotersteuerung hinsichtlich ergonomischer Bedienbarkeit (links); Wahrnehmung des Stressniveaus bei Bedienung der Robotersteuerung (rechts).

beiden Kategorien schlechter ab, als die beiden anderen Varianten. Hinsichtlich der ergonomischen Benutzung wird diese als *befriedigend* bewertet. Die Wahrnehmung hinsichtlich körperlicher und psychischer Beanspruchung während der Montage zeigt durch die optimierten Konzepte leichte Verbesserungen (vgl. Abb. 6.38). In  $K3_{opt}$  befindet sich der *Zeitdruck* im Optimum. Die empfundene *Komplexität* konnte durch die Änderungen nicht reduziert werden. Für  $K1_{opt}$  zeigt sich bzgl. der *Komplexität* das gleiche Bild, lediglich die Streuung der Bewertung geht zurück.

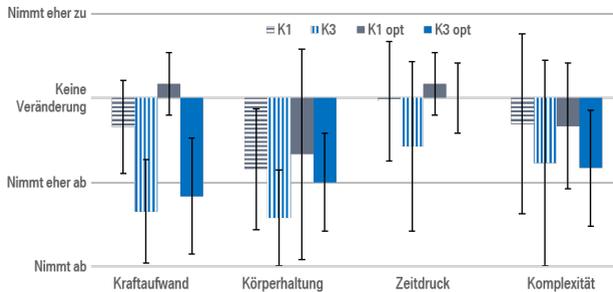


Abb. 6.38: Subjektive Bewertung der körperlichen und psychischen Beanspruchung in Abhängigkeit von Handlings- ( $K1$ ) und optimiertes Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) sowie Kombi- ( $K3$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ). Angegeben sind Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

In Bezug auf *Zeitdruck* und *Kraftaufwand* ist im Vergleich zur Bewertung im ersten Versuch ein leicht negativer Trend zu erkennen. Die Evaluation des Stressniveaus zeigt Abbildung Abb. 6.39.  $K3_{opt}$  befindet sich diesbezüglich einstimmig im Optimum und  $K1_{opt}$  zeigt eine Verbesserung um größer 50% im Vergleich zum ersten Versuch.  $K0$  wird ebenfalls deutlich besser bewertet als zuvor.

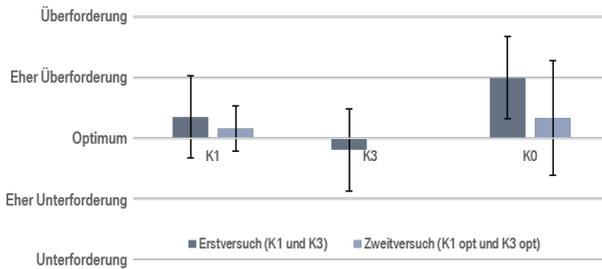


Abb. 6.39: Subjektive Bewertung des Stressniveaus während des Montageprozesses in Abhängigkeit der Konzepte  $K1 / K1_{opt}$ ,  $K3 / K3_{opt}$  und  $K0$ . Angegeben sind Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung.

### 6.4.3 Diskussion

Das Ziel des zweiten Versuchs ist, den Einfluss der Robotersteuerung durch den Menschen auf die Prozesszeit und insbesondere auf den Interaktionsfluss zu analysieren. Die Effekte wurden im vorhergehenden Ergebnisteil präsentiert und werden im Folgenden mit Bezug auf die Änderungen gegenüber dem ersten Versuch diskutiert.

#### **Versuchsaufbau und Erfahrung in der ATL-Montage**

Im optimierten Versuchsaufbau und der Erfahrung der Probanden bzgl. der Montage der ATLs liegen zwei wesentliche Ursachen, die den Einfluss der Montagekonzepte auf eine zeitliche Differenzierung verhindern. Die Erhöhung der Distanz von Bereitstellungsregal zu Montagearbeitsplatz unterbindet den Einfluss der schnelleren Teilebeschaffung durch motivierte Probanden und mindert den zeitlichen Vorteil des Handlingskonzepts aus dem ersten Versuch ab. Im Kombikonzept erhöhen sich dadurch die Wartezeiten der Probanden, da eine höhere Geschwindigkeit der Linearachse nicht realisierbar ist. Der Einfluss der Wartezeiten zwischen  $K1_{opt}$  und  $K3_{opt}$  ist bei Betrachtung der IZM deutlich zu sehen (vgl. Tabelle 6.23). Der Einfluss der Erfahrung äußert sich sowohl durch die kürzere Prozesszeit als auch durch die geringere zeitliche Streuung ( $SE_{V1} = 2.2$ ,  $SE_{V2} = 1.7$ ). Die Probanden benötigen für die wertschöpfenden Montagevorgänge im zweiten Versuch (Montage der ÖRL und der beiden KML) durchschnittlich 33.2 Sekunden weniger Zeit. Dies lässt sich über einen rechtsseitig durchgeführten Wilcoxon-Test mit einem  $p$ -Wert  $<.001$  statistisch nachweisen ( $MW_{V1} = 106.9s$ ,  $M_{V1} = 102.6s$ ,  $MW_{V2} = 73,8s$ ,  $M_{V2} = 71.5s$ ). Die Probanden reagieren mit ihrer Routine unempfindlicher auf Änderungen im Prozess. Der Einfluss des höheren Automationsgrads von  $K3_{opt}$  auf die Streuung der Zeiten zeigt sich wie im ersten Versuch deutlich. Im Vergleich zu  $K0$  und  $K1_{opt}$  weist  $K3_{opt}$  mit einem Standardfehler von 1.2 den deutlich geringsten Fehler auf ( $SE_{K1_{opt}} = 2.8$ ,  $SE_{K0} = 4.7$ ). Die Probanden nehmen

die Änderungen der Konzepte mit Ausnahme der Kollaboration und des Effekts der Informationsmodule nur geringfügig wahr. Arbeitsaufteilung und Fokus werden gleich bewertet. Die Partnerschaft in  $K1_{opt}$  wird leicht besser evaluiert als in  $K1$ . Geringe Differenzen zwischen Erst- und Zweitversuch bestehen ebenfalls bei der Bewertung der Robotertätigkeit, des Stresslevels sowie der ergonomischen Kennwerte. Bezüglich der Kollaboration wird  $K3_{opt}$  deutlich schwächer bewertet als  $K3$ . Bei  $K1$  und  $K1_{opt}$  liegt außer in der Wartezeit die gleiche Bewertung vor. Der Grund für die schlechtere Bewertung kann auf die Erfahrung der Probanden zurückgeführt werden, da diese durch Kenntnis von Ablauf und Montageprozess schneller waren als erwartet. Dementsprechend entstanden Wartezeiten für die Probanden, die die flüssige Teamarbeit negativ beeinflussten. Auf diesen Umstand ist auch die Bewertung der Wirkung und des Verständnis der Interaktionsmodule zurückzuführen. Da sie weniger Unterstützung benötigen und deshalb nicht mehr explizit auf die Interaktionsmodule achten. Trotzdem wird deren Effekt bzgl. des Verständnisses des Roboterhaltens weiter positiv bewertet, es besteht keine Differenz im Vergleich zum Vorversuch.

### **Robotersteuerung**

Die Gestensteuerung wird im Versuch nur auf eine Geste beschränkt, diese Maßnahme bewirkt im Vergleich zum Vorversuch geringere Zeitwerte ( $MW_{K1 / K1_{opt}} = 150.8/124s$ ,  $MW_{K3 / K3_{opt}} = 162.9/124.8s$ ) sowie eine geringere Streuung. Trotzdem erreichen die Probanden bei Verwendung der Gestensteuerung (auch mit nur einer Geste) nicht die Prozesszeiten der anderen Steuermodule (vgl. Tabelle 6.22). Die schwächere Eignung spiegelt sich auch in der Bewertung durch die Probanden wieder. Diese schneidet im Vergleich zum Vorversuch besser ab (vgl. Abb. 6.32), was für die Reduzierung des Gestensets spricht. Im Vergleich zu den anderen Steuerungen wird diese bzgl. der Gebrauchstauglichkeit und der ergonomischen Bedienbarkeit mit deutlicher Differenz mit *befriedigend* bewertet (vgl. Abb. 6.36). Der Buzzer weist wie im Vorversuch die beste Bewertung auf. Dies zeigt sich in

den Montagezeiten, die bei  $K1_{opt} / K3_{opt}$  im Mittel 7 / 1 (Sprachsteuerung) bis 9 / 5.5 Sekunden (Gestensteuerung) kürzer sind, und in der subjektiven Bewertung vor allem bzgl. der Kriterien Zuverlässigkeit, Reaktionszeit und intuitiver Bedienung. Für den im Rahmen des Experiments untersuchten Einsatzzweck ist der Buzzer das geeignetste Steuerungskonzept. Die Sprachsteuerung übertrifft den Buzzer jedoch in der ergonomischen Bedienung sowie im Bedienkomfort. Bei flüssiger Zusammenarbeit und positiver Wirkung auf das Gesamtergebn liegen beide gleich auf. Die Reaktionszeit der Sprachsteuerung wird von den Probanden vergleichsweise kritisch gesehen, was auf die Verbindung zur Online-Sprachdetektion rückführbar ist, die während des Versuchs zeitweise Probleme bereitete. In Bezug auf die flüssige Zusammenarbeit zeigt sich der Vorteil der Sprachsteuerung auch in den objektiven Daten, da der Anteil der ZDI an den interaktiven Zeitanteilen sowohl in  $K1_{opt}$  als auch in  $K3_{opt}$  der geringste ist (vgl. Abb. 6.31). Daraus ergibt sich die flüssigste Interaktion beider Partner, die bei den Probanden während des Experiments auch zu beobachten war. Die Anweisungen wurden, wie erwartet, während Arbeitsvorgängen erteilt, sodass der Roboter zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung stand und dadurch Wartezeiten minimiert wurden. Dies wird von den Probanden in den freien Kommentaren gewürdigt, kann jedoch die Wartezeiten, die durch die oben genannten Verbindungsprobleme entstehen, über den gesamten Prozess nicht ausgleichen. Insgesamt ist der Buzzer für den untersuchten Anwendungsfall die optimale Lösung, da er eine reaktionsschnelle und robuste Steuerungsvariante bietet, die von den Probanden intuitiv verstanden wird. Die Vorteile der Gestensteuerung liegen in der Möglichkeit, verschiedene Anweisungen über die Darstellung von Gesten zu übermitteln. Bei der Reduzierung des Gestensets auf nur eine mögliche Variante ist dieser Vorteil nicht mehr gegeben. Diese Steuerung stellt eine komplexere Form des Buzzers dar, weshalb subjektive wie objektive Ergebnisse nicht unerwartet sind. Die Sprachsteuerung kann die Erwartungen an eine flüssigere Interaktion mit dem Roboter erfüllen, eine schnellere Prozesszeit aufgrund von technischen Problemen jedoch

nicht. Das Potential der theoretisch erwarteten Prozesszeitverkürzung bestätigt sich bei Versuchen ohne technische Störung, wie die Betrachtung der Minimalwerte von  $K3_{opt}$  (vgl. Tabelle 6.22) zeigt.

### **Kollaborationseffizienz und Interaktionsfluss**

In den Kennwerten der Prozessinteraktionsanalyse zeigt sich der Effekt der Anpassungen an den Montagekonzepten. Durch die Änderungen verbessern sich die Werte für MRPE und Kollaborationsgrad (vgl. Tabelle 6.24) im Vergleich zum Vorversuch. Der Kollaborationsgrad steigt in  $K3_{opt}$  auf fast 0.5, ein Wert, den die Probanden mit ihrer subjektiven Bewertung der Fragen zu Arbeitsaufteilung und Anteil der Tätigkeiten im Prozess verifizieren (vgl. Abb. 6.33 bzw. Abb. 6.34). Das gleiche Bild zeigt sich in der Bewertung von  $K1_{opt}$ , womit die Kenngröße die subjektive Meinung der Probanden in geeignetem Maße abbildet. Hervorzuheben ist, dass in  $K1_{opt}$  mit höherem Kollaborationsgrad auch das Gefühl der Partnerschaft im Prozess steigt (vgl. Abb. 6.33). Der Bewertung der Probanden entsprechend verhält sich auch der Faktor Kollaborationseffizienz. Die Gestensteuerung erhält, besonders bei  $K1_{opt}$ , eine weitaus höhere Kennzahl als die beiden Alternativen. Die Sprachsteuerung schneidet mit dem geringsten Faktor von 0.1 bei  $K1_{opt}$  am besten ab, was über die Frage zur flüssigen Zusammenarbeit bekräftigt wird (vgl. Abb. 6.35). Somit entspricht sie den Erwartungen an das Konzept mit dem stärksten Effekt auf den Interaktionsfluss. Die im Vorversuch aufgetretene Diskrepanz zwischen dem Faktor Kollaborationseffizienz und der Wahrnehmung der Probanden, tritt nicht mehr auf. Buzzer und Sprachsteuerung entsprechen in ihrer Bewertung der Wahrnehmung der Probanden und die Gestensteuerung wird aufgrund der vergleichsweise hohen ZDI auch korrekt bewertet.

Bezüglich der MRPE ist anzumerken, dass sich diese für alle Steuerungskonzepte auf einem ungefähr gleichen Niveau befindet, die real gemessenen Zeiten aber deutlichere Unterschiede aufweisen (vgl. Tabelle 6.22). Dies fällt im Besonderen bei den Konzepten mit Sprachsteuerung auf. Hierbei

Tab. 6.24: Kennwerte der Prozessinteraktionssystematik in Abhängigkeit der Montagekonzepte

	$KI_{Bopt}$	$KI_{Gopt}$	$KI_{Sopt}$	$K3_{Bopt}$	$K3_{Gopt}$	$K3_{Sopt}$
<b>MRPE</b>	0.18	0.17	0.10	0.57	0.60	0.52
$\varphi_k$	0.15	0.15	0.13	0.46	0.48	0.44
$\vartheta_k$	0.27	1.31	0.10	0.28	0.34	0.21
$\kappa_k$	0.88	-0.16	1.03	1.18	1.14	1.23
<b>PIE</b>	1.06	0.01	1.14	1.75	1.74	1.75

*Anmerkung.* Aufgeführt sind opt. Handlingskonzept ( $K1_{opt}$ ) und opt. Kombikonzept ( $K3_{opt}$ ) mit Robotersteuerung per Buzzer (B), Geste (G) oder Sprache (S), sowie Mensch-Roboter-Prozesseffizienz (MRPE), Kollaborationsgrad ( $\varphi_k$ ), Kollaborationseffizienz ( $\vartheta_k$ ), Kollaborationskoeffizient ( $\kappa_k$ ) und Prozessinteraktionseffizienz (PIE).

zeigt sich der wichtige Einfluss der Kollaboration auf die Bewertung des Prozesses. Mit Einbezug des Kollaborationskoeffizienten innerhalb der PIE gleichen sie sich den Kennzahlen der subjektiven Wahrnehmung an. Dies wird am PIE-Wert für  $K1_{Gopt}$  deutlich. Die vergleichbare Kennzahl für die PIE der drei Steuerungskonzepte in  $K3_{opt}$  ist anhand der Prozessgestaltung zu erklären. Über den hohen Automatisierungsgrad und die Arbeitsteilung ist der Prozess robuster gegenüber Störungen, wodurch sich die Wahl der Steuerung nur noch geringfügig korrigierend auf das Gesamtergebnis auswirkt.

Die ermittelten Werte der PIS ermöglichen es, sowohl die gemessenen Zeiten, als auch die subjektive Wahrnehmung der Probanden abzubilden. Die Erkenntnis des Vorversuchs wird im Rahmen dieses Experiments mit Einbeziehung der Sprachsteuerung bekräftigt. Die Bedeutung der Interaktion für den Prozessablauf wird über die Ergebnisse hervorgehoben. Dies zeigt sich über die Relevanz von Interaktionsfluss und Kollaborationsgestaltung für die Gesamtbewertung der MRI besonders in der Bewertung von  $K3_{opt}$ . Diese ist mittels der abgeleiteten Empfehlungen der PIS möglich, womit diese verifiziert werden.

## 6.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel widmet sich den experimentellen Untersuchungen, die sowohl die Annahmen der PIS verifizieren, als auch die entworfenen Schnittstellenkonzepte evaluieren. Dazu werden der theoretische Hintergrund sowie die Zielsetzung der Untersuchung erläutert. Nachfolgend wird auf die angewandte Methodik der Experimente eingegangen, die Ergebnisse werden präsentiert und im Anschluss diskutiert.

Der Fokus des ersten Versuchs mit den Zielgrößen Prozesszeit und Ergonomie liegt auf der Evaluation der Prozessgestaltung. Es wird gezeigt, dass sowohl Montagekonzept, als auch Robotersteuerung einen signifikanten Effekt auf die Prozesszeit und den Interaktionsfluss der Kollaboration besitzen. Die Betrachtung der Montagevarianten anhand der Zielgröße Prozesszeit hebt das Konzept mit dem geringsten Roboteranteil hervor. Werden die Montagevarianten anhand der PIS betrachtet, wird das Konzept mit dem höchsten Roboteranteil präferiert. Dies korreliert mit der Wahrnehmung der Probanden. Des Weiteren kann dem Montagekonzept und darin der Art der Robotertätigkeit statistisch ein Effekt auf die Ergonomie nachgewiesen werden. Bezüglich der Art der Robotersteuerung ist dies nicht möglich. Der Einsatz der Informationsmodule wird von den Probanden als hilfreich wahrgenommen, eine statistische Signifikanz ist nicht nachweisbar. Aus den Erkenntnissen des Vorversuchs werden für die zweite Untersuchung Verbesserungen am Aufbau abgeleitet und umgesetzt. Der Fokus liegt hierbei auf dem Faktor Robotersteuerung und untersucht dessen Effekt auf die Prozesszeit. Letzterer kann in Bezug auf die gesamte Prozesszeit nicht nachgewiesen werden, in Bezug auf den Interaktionsfluss ist dies jedoch möglich. Die Annahmen der PIS werden auch in diesem Experiment bestätigt. Die Ergebnisse beider Versuche zeigen, dass die Erwartung einer reduzierten Prozesszeit über die Integration eines Roboters erfüllt wird und ein positiver Effekt auf den Prozessablauf von dessen Ausgestaltung abhängt.

Die Wahrnehmung der Probanden bzgl. der Robotersteuerung sowie der Informationsmodule steht in Einklang mit der resultierenden Prozesszeit.



## 7 Diskussion

In diesem Kapitel werden die entwickelten Schnittstellenkonzepte sowie die konzipierte Methodik zur Beschreibung des MRI Prozesses unter Einbeziehung der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen und der Forschung zusammenfassend diskutiert. Abschließend werden Implikationen für die MRS sowie die Prozessgestaltung getroffen.

### 7.1 Mensch-Roboter-Schnittstelle

Eine menschenzentrierte Benutzerschnittstelle bietet nach DIN EN ISO 9241 (2011) ökonomische und ergonomische Vorteile. Diese werden über eine verbesserte Gebrauchstauglichkeit der Schnittstelle erreicht, die den Prozess effizienter und effektiver macht. Zudem wird über die benutzergerechte Gestaltung die Zufriedenheit des bedienenden Menschen erhöht, was zu einer Reduzierung von Stress und Erhöhung der Produktivität führt. Vor diesem Hintergrund werden die konzipierten MRS im Folgenden diskutiert und bewertet. Der Abschnitt schließt mit den Implikationen zur Gestaltung einer Schnittstelle.

#### 7.1.1 Eignung der konzipierten Mensch-Roboter-Schnittstelle

Die Gebrauchstauglichkeit der MRS in einem industriellen Montageumfeld hängt maßgeblich von den Umgebungsbedingungen des Prozesses ab. Die Untersuchungen bzgl. der Robotersteuerung zeigen, dass eine Steigerung der Effizienz über natürliche Benutzerschnittstellen möglich ist, diese ihre Vorteile in einem linear geführten (sequenziellen) Montageprozess jedoch nicht voll entfalten kann. Dies liegt an der Anweisungsform einer solchen Prozessgestaltung. Dadurch, dass variable Anweisungen (Vorteil der natürlichen Benutzerschnittstelle) obsolet sind, kann diese über ein einfaches „nächster Schritt“ realisiert werden. Aus diesem Grund ist es ersichtlich,

dass das Konzept des Buzzers die höchste Effizienz sowie eine breite Zustimmung der Probanden hervorruft. Das Konzept der Gestensteuerung ist für die untersuchte Applikation hingegen ungeeignet. Es gleicht (vor allem in der reduzierten Funktionsweise des letzten Experiments, vgl. Kap. 6.4.1) dem Bedienkonzept des Buzzers mit dem Unterschied, dass die Nutzung komplexer ist und eine längere Eingewöhnung erfordert, die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nicht abgebildet werden kann. Prinzipiell erweist sich die kamerabasierte Ausführung der Gestensteuerung mittels Fingergesten, wie sie bei Gleeson et al. (2013) angewandt wurde, als geeignet (vgl. Kap. 4). Die Verwendung im Rahmen eines linearen Prozesses verschafft jedoch keinen Mehrwert. Die Verwendung von Körpergesten, wie sie Barattini, Morand und Robertson (2012) in ihrer Studie nutzen, erfordert, abgesehen von der gleichbleibenden Anwendungsproblematik, weitere Bewegungsabläufe, die im Sinne der MTM-Logik zusätzliche Zeit in Anspruch nehmen. Dies würde sich als Nachteil erweisen.

Die Sprachsteuerung erreicht in den Experimenten die Effizienz des Buzzers und wird in ihrer Nutzbarkeit sowie der Langzeiteignung im Vergleich zu den anderen Konzepten als am besten geeignet wahrgenommen. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von Khan (1998) im Bereich der Servicerobotik, bei der die Steuerung per Sprache anderen Konzepten stets vorgezogen wurde. Der gewählte hybride Ansatz mit formaler Schlüsselworterkennung und folgender Anweisung in natürlicher Sprache ermöglicht dem Menschen im linearen Prozess zumindest eine Variation in der Formulierung der Anweisungen. Ein rein formeller Sprachansatz (vgl. Kap 4.1.1.2), der die Wiederholung der gleichen Anweisungen erfordert, würde die Benutzerfreundlichkeit der Schnittstelle herabsetzen. Dennoch ist auch bei Betrachtung des gewählten hybriden Ansatzes kritisch zu hinterfragen, ob es ein Werker in der bestehenden Prozessstruktur präferiert in der vorgegebenen Taktzeit repetitiv sinngemäß ähnliche bzw. gleiche Anweisungen zu wiederholen oder „nur“ auf eine Schaltfläche zu drücken.

Unter der Annahme, dass sich die Prozessstruktur in der Montage nicht ändert, ist die Gebrauchstauglichkeit einer Gestensteuerung im Rahmen der untersuchten Anwendungsfälle nicht gegeben. Sie führt weder zu einer Steigerung der Prozesseffizienz, noch zur Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit. Die Sprachsteuerung besitzt gegenüber den anderen Varianten Vorteile in der Bedienbarkeit, die durch ihre Form der Informationsübertragung bedingt ist. Diese zeigen sich in den Ergebnissen der Experimente mit Erhöhung der Prozesseffizienz. Trotzdem stellt der Buzzer das Schnittstellenkonzept dar, das dem erforderlichen Anweisungsprofil eines linearen Prozesses am besten entspricht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen dies über die unterschiedlichen Montagekonzepte hinweg. Nachteilig wirkt sich die ortsabhängige Anweisungsabgabe aus, die der Sprachsteuerung prozessuale Vorteile verschafft, sich jedoch nicht als entscheidend darstellt. Im Rahmen der Eignungsdiskussion zur Robotersteuerung ist einschränkend zu erwähnen, dass es sich bei den verwendeten Steuermodulen um eigens entwickelte Systeme handelt, die in ihrer Funktionalität ausschließlich im Rahmen dieser Arbeit und in keinem Langzeitversuch untersucht wurden. Zudem besaßen die Probanden keine Erfahrung in der Nutzung der Systeme, was sich vor allem im Falle der Gestensteuerung nachteilig auswirkt.

Die Untersuchungen bzgl. der Eignung der Informationsmodule ergeben in deutlicher Übereinstimmung mit der Expertenbefragung, dass die einfachen visuellen und auditiven Formen der Informationsübertragung am besten geeignet sind. Unabhängig vom betrachteten Prozess hängt deren Effekt ebenfalls von der Rolle des Menschen ab (vgl. Kap. 5). Die Untersuchungen mit einem unbeteiligten Betrachter heben das Konzept der Leuchtringe hervor. Die anderen Systeme zur Informationsübertragung des Roboterhaltens werden als nicht tauglich wahrgenommen. Befindet sich der Mensch in der Position eines aktiv Beteiligten, werden inhaltliche Informationssysteme präferiert, die diesen bei seiner Tätigkeit unterstützen. Statusanzeigen des Roboters werden nicht explizit wahrgenommen, tragen aber dennoch zum besseren Verständnis des Roboterhaltens bei (vgl. Abb. 6.35). Damit kön-

nen Ergebnisse der Studien von Arai et al. (2010) sowie Fischer et al. (2014) auch für diesen Anwendungsfall der MRI bestätigt werden. Für eine höhere Aussagekraft der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Ergebnisse bzgl. des Effekts der Informationsmodule sind Langzeituntersuchungen durchzuführen, die die erhobenen subjektiven Daten anhand von objektiven Messmethoden validieren. Hierbei wären physiologische Methoden, wie sie bei Arai et al. (2010) oder Kulic und Croft (2006) Anwendung finden, sowie Eye-Tracking Untersuchungen durchzuführen. Im besonderen Interesse wäre die Wahrnehmung des Roboters bzw. der Interaktionsmodule während des Montagevorgangs.

### **7.1.2 Implikationen für die Gestaltung einer Mensch-Roboter-Schnittstelle**

Ein Ziel dieser Arbeit bestand darin, zu untersuchen, wie eine MRS für den interaktiven Montageprozess in einem industriellen Umfeld zu gestalten ist, um eine Steigerung der Effizienz des Arbeitssystems zu erreichen. Dies bedarf einer Fallunterscheidung zwischen den heute üblichen sequentiellen Montageprozessen und möglichen flexibleren Fertigungskonzepten, wie sie in Abbildung Abb. 1.1 in einer visionären Form skizziert sind.

Die Struktur heutiger Montagesysteme basiert auf der sequentiellen Abfolge von Prozessen, die in ihrer Reihenfolge nur bedingt variierbar sind. Ein Roboter, der den Werker im Rahmen einer Montage vergleichbar zur Form des Interaktionsszenarios (vgl. Kap. 3.1) unterstützt, erfordert deshalb mindestens eine informative Schnittstelle, die dem Menschen dabei hilft, das Verhalten des Roboters zu interpretieren. Die Ergebnisse der durchgeführten Studien zeigen dies für beide Perspektiven der Interaktion (aktive oder passive Rolle des Menschen). Ein visuelles Konzept, das am Roboter angebracht ist, erfährt im Rahmen der Untersuchungen die höchste Zustimmung. Bei Bedarf ist ein einfacher auditiver Informationskanal zu ergänzen, der den Menschen zu besonderen Ereignissen im Prozess selektiv informiert. Des

Weiteren ist eine visuelle Information zum Montageablauf zu integrieren, die den Werker bei Bedarf selektiv unterstützt (bspw. in Form eines Werkerleitsystems). Als Steuerschnittstelle ist anhand der Ergebnisse eine einfache, robuste Form abzuleiten, die es dem Menschen ermöglicht, intuitiv den nächsten Prozessschritt einzuleiten. Beispiele hierfür sind Konzepte wie der verwendete Buzzer oder industrielle Schaltflächen. Die Sprachsteuerung besitzt aufgrund ihrer einfachen intuitiven Art der Informationsübermittlung ein großes Potential, das innerhalb einer Langzeituntersuchung zu evaluieren wäre.

In Konzepten für flexiblere Montagesysteme, die eine variable Prozessabfolge ermöglichen, (vgl. ARENA 2036, 2017), besitzen natürliche Steuerungssysteme, wie in der EFFIROB-Studie (Hägele, Blümlein & Kleine, 2011) postuliert, einen klaren Vorteil. Insbesondere die Sprachsteuerung, die über die Möglichkeit der ortsunabhängigen Informationsübermittlung entfernte Systeme über verschiedene Anweisungen steuern kann. Die Potentiale der Steuerungskonzepte sind aus den experimentellen Untersuchungen ersichtlich. Inwiefern sich die variable Informationsübermittlung positiv auf derartige Montageanwendungen auswirkt, ist zu verifizieren.

## 7.2 Montageprozess

Die Gestaltung des roboterunterstützten Montageprozesses wird im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich ihres Effekts auf die Ergonomie sowie die Effizienz untersucht. Um die Auswirkungen auf den Prozess mittels einer geeigneten Methode abbilden zu können, wird die PIS konzipiert, die über die experimentellen Untersuchungen validiert wird. Im Folgenden wird diskutiert, inwiefern sich die Methodik eignet, den interaktiven Prozess zu beschreiben und sich dabei von anderen Vorgehensweisen unterscheidet. Die Präsentation der daraus resultierenden Implikationen für die Gestaltung eines MRI Prozesses schließt das Kapitel ab.

### 7.2.1 Eignung der Prozessinteraktionssystematik zur Beschreibung einer Mensch-Roboter-Interaktion

Die in Kap. 4 vorgestellte Prozessinteraktionssystematik (PIS) zur Beschreibung der Interaktionseffizienz, kombiniert die Analyse der zeitlichen Prozessanteile von Mensch und Roboter mit der des Kollaborationsprozesses und verbindet diese in der Kennzahl der Prozessinteraktionseffizienz (PIE). In den durchgeführten Untersuchungen zu Prozessgestaltung und Einfluss der Robotersteuerung (Kap. 6) wird die Anwendbarkeit der Methodik auf den adaptierten Montageprozess für Prozesse mit einem Interaktionsanteil von größer 40% bestätigt. Gemäß den Vorüberlegungen entspricht der Interaktionsanteil Applikationen, die dem identifizierten Interaktionsszenario gleichen. In diesem Bereich zeigen die Ergebnisse die ganzheitliche Beschreibung des kollaborativen Prozesses mittels der über die PIS bereitgestellten Kenngrößen, indem diese sowohl die rein zeitwirtschaftliche Betrachtung, als auch die subjektive Wahrnehmung des Menschen widerspiegelt (vgl. Kap. 6.3 und 6.4). Letzteres wird über die Gleichsetzung des Kollaborationskoeffizienten gegenüber der Mensch-Roboter-Prozesseffizienz (MRPE) in der Berechnung der PIE ermöglicht. Somit bezieht die PIS die Zufriedenheit der Menschen mit dem Arbeitssystem, die sich hauptsächlich aus einer flüssigen Zusammenarbeit generiert und letztlich zu einer Erhöhung der Produktivität führt, in die Bewertung mit ein und berücksichtigt damit die Studienergebnisse von Hoffman (2013) sowie Unhelkar, Siu und Shah (2014). Wie bereits in der Literatur festgestellt, wird der Einfluss der flüssigen Interaktion auf die Zusammenarbeit durch die Untersuchungen nochmals hervorgehoben. Dies zeigt sich darin, dass die Varianten des Montageprozesses mit der höchsten Kollaborationseffizienz auch die höchste (subjektive) Bewertung erhalten (vgl. Tabelle 6.24). Nachteil dieser Betrachtungsweise und des Fokus auf die Kollaboration ist, dass Prozesse mit geringer Interaktion (Anteil kleiner 30%) mittels der PIS nicht korrekt erfasst werden (vgl.  $KI/K_{1_{opt}}$ , Tabelle 6.24). Zudem kann die Abhängigkeit

der Aussage von der verwendeten MRS als kritisch betrachtet werden, da eine für den Gebrauch nicht taugliche Schnittstelle einen großen Effekt auf die Gesamtbewertung hat. Dieser Sachverhalt spricht im Gegenzug für die ganzheitliche Betrachtungsweise des Modells. Einschränkungen bestehen durch den alleinigen Fokus auf zeitliche Angaben. Prozessuale Einflussfaktoren wie beispielsweise die Ergonomie werden nicht abgebildet, womit diesbezügliche Aussagen nicht möglich sind.

Ein Vergleich zu anderen prozessbeschreibenden Methoden zeigt, dass sich die PIS maßgeblich durch die Integration der Kollaborationseffizienz als Bewertungsfaktor abgrenzt. Methoden wie MTM oder die *Maynard Operations Sequence Technique* beziehen sich in ihrer Aussage auf bekannte vorbestimmte Zeiten des Montageprozesses. Daten zu kollaborierenden Prozessfaktoren sind in diesen bisher nicht erfasst. Die PIS kann demnach als Ergänzung der MTM-Analyse herangezogen werden, da ihre Aussage unter anderem auf der theoretischen Bewertung der MTM-Methode aufbaut und diese um die Betrachtung der Kollaboration ergänzt. In Relation zur Beschreibung der Zeitanteile von Hoffman (2013) stellt die PIS eine Erweiterung auf das Produktionsumfeld dar. Diese detailliert die Zeitanteile zusätzlich und erweitert die Aussagekraft über die Einführung von Kennzahlen. Abschließend ist zu erwähnen, dass die getroffenen Aussagen auf den Untersuchungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, basieren. Für eine tiefere Eignungsbewertung der PIS ist diese anhand eines größeren Datensatzes über weitere MRI Applikationen in der Montage zu validieren.

## **7.2.2 Implikationen für die prozessuale Gestaltung einer Mensch-Roboter-Interaktion**

Neben der Gestaltungsempfehlung für die MRS ist es Ziel dieser Arbeit, eine Methodik zur Beschreibung und Bewertung der Interaktion von Mensch und Roboter in kollaborativen Prozessen im Sinne des Interaktionsszenarios (vgl. Kap. 3.1) zu entwickeln, die es ermöglicht, den Effekt der Interaktion auf die bestehenden Zielgrößen zu beschreiben.

Für den interaktiven Prozess in der Montage ergeben sich zwei Gestaltungsfelder. Zum einen ist dies die Makroebene, die die Arbeitsanteile der Partner sowie die prozessuale Abfolge beinhaltet, und zum anderen die Mikroebene, auf der die Gestaltung der eigentlichen Kollaboration (Informations- und Teilaustausch) mit dem Roboter betrachtet wird. Beide Ebenen sind in der PIE vertreten, womit die Prozessgestaltung über die PIS validierbar ist. Für die Makroebene ergeben sich folgende, über die Experimente verifizierte, Gestaltungsempfehlungen. Es ist darauf zu achten, dass die Tätigkeiten des Menschen am Prozess überwiegen und dabei keine langen Wartezeiten auftreten. Diese Richtlinien der menschenzentrierten Prozessgestaltung finden sich im anzustrebenden realistischen Kennwert der MRPE von 0.5 wieder. Dieser bedeutet, dass der Kollaborationsprozess effizient gestaltet ist, da aktive Zeiten des Menschen überwiegen und parallele Handlungsstränge beider Partner realisiert werden. Als entscheidend für die Mikroebene gestaltet sich die Kollaborationseffizienz, die kombiniert mit ihrem Prozessanteil (Kollaborationsgrad) in den Kollaborationskoeffizienten eingeht. Es geht hervor, dass sich ein geringer Wert nahe Null optimal auf den Interaktionsfluss und darüber hinaus auf die Wahrnehmung des Menschen auswirkt. Er hängt somit von der Gestaltung der Schnittstelle ab, die im Montageprozess eine einfache und robuste Informationsübermittlung ermöglichen muss. Werden beide Richtwerte beachtet, resultiert ein effizienter interaktiver Prozess, der sowohl für Mensch, als auch für das Produktionssystem, Vorteile mit sich bringt.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Forschungsbedarfe gegeben, die in Zusammenhang mit den Ergebnissen der Arbeit stehen.

### 8.1 Zusammenfassung

Volatile Märkte sowie wechselnde Regulierungen einzelner Länder erzeugen Herausforderungen, die eine Weiterentwicklung des Produktionssystems in der Automobilindustrie erfordern. Für die Anpassung an neue Umgebungsbedingungen sind wandlungsfähige und flexible Produktionssysteme notwendig. Einen Lösungsansatz stellt die Mensch-Roboter-Interaktion dar, die aufgrund des technischen Fortschritts in den Bereichen Robotik und Sensorik auch für die industrielle Anwendung Vorteile mit sich bringt. Dies gilt insbesondere für die Montage, in der Roboter nicht ergonomische, repetitive Aufgaben übernehmen können. Für die Integration einer kollaborativen Anwendung sind vorab Bedarfe und spezifische Anforderungen des industriellen Umfelds zu klären, die in der vorliegenden Arbeit im Rahmen einer zweistufigen Bedarfsanalyse aufgezeigt werden. Im ersten Schritt werden auf der Basis bestehender sowie zukünftig möglicher Applikationen potentielle Szenarien für die Umsetzung einer MRI identifiziert. Es resultieren drei Anwendungsvarianten die sich bzgl. Automatisierungsgrad, Interaktionsbedarf, Mobilität, Informationsaustausch sowie autonomer Entscheidungsfindung differenzieren. Im zweiten Schritt der Bedarfsanalyse erfolgt die Ermittlung allgemeiner sowie szenarienspezifischer Anforderungen an die Realisierung von MRI-Anlagen in der Montage. Es ergeben sich zum einen allgemeine, offensichtliche Anforderungen technischer sowie sicherheitstechnischer Art. Und zu anderen spezifische Herausforderungen, die Prozessablauf sowie Gestaltung der Interaktion in einer kollaborativen Anwendung betreffen. Aus der Bedarfsanalyse werden nach Abgleich mit dem Stand der Forschung

Handlungsbedarfe abgeleitet, die sich für die Umsetzung eines Szenarios mit einem höherem Bedarf an Interaktion und einer damit einhergehenden Kommunikation zwischen Mensch und Roboter ergeben. Die Zielsetzung besteht darin, eine geeignete Mensch-Roboter-Schnittstelle zu konzipieren, um eine flüssige Interaktion zu befähigen, und den Effekt dieser Schnittstelle auf den Prozess über eine Methode messbar abzubilden. Anhand bereits im Einsatz befindlicher Mensch-Maschinen-Schnittstellen in der Automobilproduktion werden informationsübertragende Konzepte entwickelt, die dem Menschen bei Verständnis und Kommunikation mit dem Roboter unterstützen. Diese Konzepte basieren sowohl auf der visuellen, als auch auf der auditiven Informationsübertragung. Es werden drei visuelle Systeme entwickelt, wovon zwei eine einfache Informationsübertragung in Form von Lichtsignalen ermöglichen und eines komplexere Informationen in Form von Textanweisungen übermittelt. Für auditive Systeme besteht ein Konzept zur einfachen Mitteilung in Form von Tonsignalen und eines, das komplexere Nachrichten an den Menschen sendet. Zur Steuerung des Roboters werden drei Konzepte entwickelt, zwei auf Basis natürlicher Benutzerschnittstellen und eines, das einem in der Industrie üblichen Schalter entspricht. Die natürlichen Benutzerschnittstellen werden über Gesten- und Sprachsteuerung realisiert. Die Methodik zur Bewertung des interaktiven Prozesses wird auf der Basis von Zeitanteilen der Prozesspartner konzipiert, die es ermöglicht, den Prozess zu beschreiben und dabei sowohl die partnerschaftliche Gestaltung, als auch die flüssige Interaktionsgestaltung zu erfassen. Mit Abschluss der Konzeption geht die Arbeit vom theoretischen in den experimentellen Teil über.

Die entwickelten Konzepte der Mensch-Roboter-Schnittstelle werden im Rahmen einer experimentellen Evaluation bzgl. ihrer technischen Gebrauchstauglichkeit untersucht, um mögliche (technische) Fehler oder negative Effekte für nachfolgende Untersuchungen auszuschließen. Für die Untersuchungen werden unterschiedliche Aufbauten und Vorgehensweisen genutzt, um aus dem jeweiligen Schnittstellenkonzept entsprechende Ergebnisse zu erhalten. Die Evaluation der natürlichen Steuerkonzepte fokussiert die

Reaktionszeit und die Zuverlässigkeit, um deren Akzeptanz für die Anwendung sicherzustellen. Die Untersuchung der Informationsmodule legt den Schwerpunkt auf die Wahrnehmung des Robotersystems. Dies beinhaltet sowohl die Untersuchung, ob die Wahrnehmung anderer Faktoren durch die Informationsmodule positiv beeinflusst werden kann, als auch welche Form der Informationsübertragung die geeignetste ist. Anhand der Ergebnisse wird die Gebrauchstauglichkeit der konzipierten Schnittstellen nachgewiesen und erste Implikationen für die spätere Verwendung abgeleitet. Statusinformationen des Roboters sind am besten visuell zu übertragen und die Steuerung per Sprache wird leicht besser bewertet als die per Geste. Die Erkenntnisse fließen in die Evaluation der Gestaltung eines roboterunterstützten Montageprozesses aus der Vormontage ein, in dem der Einfluss unterschiedlicher Montagekonzepte und Robotersteuerungen in Kombination mit den Informationsmodulen auf Prozesszeit und Ergonomie untersucht wird. Dies dient der Verifizierung der Aussagen aus der Prozessinteraktionsanalyse sowie der weitergehenden Untersuchung der Schnittstellenkonzepte. Es wird gezeigt, dass sowohl Montagekonzept, als auch Robotersteuerung einen signifikanten Effekt auf die Prozesszeit und den Interaktionsfluss der Kollaboration besitzen. Des Weiteren kann dem Montagekonzept und darin der Art der Robotertätigkeit statistisch ein Effekt auf die Ergonomie nachgewiesen werden. Der Einsatz der Informationsmodule wird von den Probanden als hilfreich wahrgenommen, eine statistische Signifikanz ist aber nicht nachweisbar. Die Annahmen der PIS werden anhand dieses Experiments bestätigt. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Erwartung einer reduzierten Prozesszeit über die Integration des Roboters erfüllt wird und ein positiver Effekt auf den Prozessablauf von dessen Ausgestaltung abhängt. Die Wahrnehmung der Probanden bzgl. der Robotersteuerung sowie der Informationsmodule stehen in Einklang mit der resultierenden Prozesszeit und zeigen deutlich, welche Vorteile eine flüssige Prozessgestaltung mit sich bringt.

Neben der Identifizierung einer geeigneten MRS für die flüssige Interaktion in einem Montageprozess, ermöglichen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit die methodische Erfassung interaktiver Prozesse und bieten ein Werkzeug zur Prozessbewertung zukünftiger Applikationen. Über ökonomische Gesichtspunkte hinaus ist die partnerschaftliche Gestaltung damit erfassbar, womit eine Methode zur ganzheitlichen Prozessbewertung bereitgestellt wird, die bei Beachtung der darin definierten Kenngrößen ein für Mensch und Produktionssystem optimales Ergebnis erzielt.

### 8.2 Ausblick

Die im Rahmen der Arbeit erhobene Daten basieren auf experimentellen Versuchen im Laborumfeld. Für eine weitergehende Validierung sollten Untersuchungen im Werksumfeld erfolgen. Diese hätten primär das Ziel, eine Langzeituntersuchung zur Validierung der Eignung von Interaktionssystematik sowie Schnittstelle durchzuführen, da bisher nur Querschnittstudien erfolgt sind. Ein weiterer zu evaluierender Einflussfaktor hierbei sind die Erfahrungswerte der Probanden bzgl. Steuerung und Montageablauf, die über einen längeren Zeitraum aufgebaut werden. Zielgrößen wären, neben Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit der Sprachsteuerung im Werksumfeld, die Wirkung der Informationsmodule auf unbeteiligte sowie beteiligte Personen. Abschließend ist zudem der Einsatz des Systems mit Werkern anzustreben, um vor dem Hintergrund ihrer Prozessenerfahrung die Ergebnisse dieser Arbeit zu validieren. Neben der Erfahrung und Eignung der entwickelten Konzepte sind sekundär die Effekte von Störfaktoren des Produktionsumfelds auf den Prozess zu erfassen. Zielsetzung sollte die Untersuchung der Interaktion des Robotersystems mit anderen Produktionselementen, wie bspw. unbeteiligten Personen sein. Der Effekt einer unbeteiligten Person auf den Teilebereitstellungsprozess sowie Interaktionsfluss und diesbezügliche Lösungsansätze wurden von Unhelkar et al. (2018) unter den gleichen Laborbedingungen untersucht. Über eine reaktive Pfadplanung des Roboters in Kombination

mit einer Prädiktion der Laufwege des Menschen konnte die Leistung des Arbeitssystems signifikant verbessert werden. Eine weiterführende Studie zum Umgang mit erweiterten Störgrößen im realen Werksumfeld wäre der nächste Schritt zur Validierung der Daten.

Des Weiteren besteht der Bedarf, die PIS, die anhand eines Anwendungsfalls aus der Automobilmontage untersucht wurde, industrieübergreifend zu validieren. Die Montage ist in fast allen fertigenden Betrieben Teil der Wertschöpfungskette und da das Montageszenario anhand genereller Kriterien abgeleitet wurde, ist das Modell auf andere Industriezweige potentiell übertragbar. Besonders in der Kleinteilfertigung, in der Montagearbeitsplätze der untersuchten Art häufiger auftreten, besteht ein Anwendungsfeld für die weiterführende Validierung der PIS. Zudem bietet sich die Möglichkeit, das Modell auf Anwendungen mit mobilen Robotern zu übertragen (vgl. Hägele, Blümlein & Kleine, 2011). Dies würde eine Anpassung des Modells an autonome Systeme erfordern und die Beschreibung eines flexibleren Prozessablaufs ermöglichen. Interessant wäre dabei der Vergleich des Interaktionsflusses mit dem eines sequenziellen Prozesses.

Abschließend ist die automatisierte Bewertung des kollaborativen Prozesses in Kombination mit der Erfassung ergonomischer Daten über ein Motion-Tracking-System denkbar. Dies wäre vergleichbar mit der kamerabasierten Durchführung der OWAS-Analyse, deren Bewertungsmethode ebenfalls auf der Messung von Zeitanteilen basiert. Über die kombinierte Erfassung der ergonomischen und interaktionsbezogenen Daten ist somit eine ganzheitliche Prozessbetrachtung über ein Messsystem realisierbar.



## 9 Literaturverzeichnis

- Acatech (Hrsg.). (2016). *Innovationspotentiale der Mensch-Maschine-Interaktion. acatech Impuls*. München: Herbert Utz Verlag.
- AMIKA. (2017). Adaptive Mensch-Maschine-Schnittstellen für komplexe Automationssysteme. Zugriff am 17.04.2017: <https://www.ipr.kit.edu/projekte2042.php>
- Arai, T., Kato, R. & Fujita, M. (2010). Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, p. 5-8.
- ARENA2036. (2016). Forschungscampus ARENA2036 - Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles. Zugriff am 14.02.2017: <http://www.arena2036.de/de/arena2036/inhalte-und-ziele>
- Audi Smart Factory. (2016, November). Presse-Basisinformation. Audi TechDay Smart Factory. Zugriff am 12.12.2019: [http://108.129.43.99/media/musterseite-copy-copy-copy-54d4842a-e8fd-48eb-b501-5b70174fc173/file/4615/161117\\_Audi\\_TechDay\\_Smart\\_Factory\\_DE.pdf](http://108.129.43.99/media/musterseite-copy-copy-copy-54d4842a-e8fd-48eb-b501-5b70174fc173/file/4615/161117_Audi_TechDay_Smart_Factory_DE.pdf)
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Wiber, R. (2016). *Multivariate Analysemethoden. Eine Anwendungsorientierte Einführung* (14. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.
- Barattini, P., Morand, C. & Robertson N.M. (2012). A proposed gesture set for the control of industrial collaborative robots. In *IEEE, 2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Paris, Frankreich, p. 132-137.
- BauA. (2019). Leitmerkmalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen (LMM-MA). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Zugriff am 08.10.2019: [https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/pdf/LMM-Manuelle-Arbeit.pdf%3F\\_blob%3DpublicationFile](https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/pdf/LMM-Manuelle-Arbeit.pdf%3F_blob%3DpublicationFile)

- Baudel, T. & Beaudouin-Lafon, M. (1993). Charade: Remote Control of Objects Using Free-hand Gestures. *Communications of the Association for Computing Machinery*, Vol. 36, No. 7, p. 28-35.
- Becker, T. (2008). *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin: Springer.
- BGIA (Institut für Arbeitsschutz der DGUV). (2007). Das "Rapid Upper Limb Assessment (RULA)". Auszug aus dem BGIA-Report 2/2007 Muskel-Skelett-Erkrankungen der oberen Extremität. Zugriff am 15. 08. 2016: [http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/rep/pdf/rep07/\\_biar0207/rula.pdf](http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/rep/pdf/rep07/_biar0207/rula.pdf)
- Bilal, S., Akmeliawati, R., Salami, M. J. E. & Shafie A. A. (2011). Vision-based hand posture detection and recognition for sign language - a study. In *IEEE, 2011 4th International Conference on Mechatronics (ICOM)*, Kuala Lumpur, Malaysia, p. 1-6.
- Bix, J. (2019). *Mobile Robotik in der bandsynchronen Montage zur flexiblen Mensch-Roboter-Interaktion*. Dissertation. Universität Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Blue Ocean Robotics. (2017). Beam Pro im Büro. Zugriff am 08.02.2017: [http://www.blue-ocean-robotics.com/de/loesungen/sonstige\\_/telepraesenz-roboter/beam-pro-at-the-office](http://www.blue-ocean-robotics.com/de/loesungen/sonstige_/telepraesenz-roboter/beam-pro-at-the-office)
- Blume, J. (2014). *Methoden und Anwendung zur intuitiven Mensch-Roboter-Interaktion*. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag.
- BMW AG. (2016). *BMW Produktionssystem Kurzportrait*. Unveröffentlichte Daten.
- BMW Dingolfing. (2017). BMW Factory Humans & Robots work together. Zugriff am 09.04.2017: <https://www.youtube.com/watch?v=Dm3Nyb2ICvs>
- BMW Group Presse-Information. (2016, 16. Mai). Presse-Information. Innovative Ansätze in der Produktion: BMW Group setzt im Produktionsnetzwerk auf Digitalisierung, Ergonomie und Nachhaltigkeit.

- BMW Leipzig. (2017). Digitalisierung in der Produktion. Zugriff am 10.04.2017: <https://www.youtube.com/watch?v=Fl-07xSdjt0>
- BMW PS. (2016). *BMW Produktionssystem*. Unveröffentlichte Daten.
- Bolt, R. A. (1980). "Put that there": voice and gesture at the graphics interface. In Association for Computing Machinery, *Proceedings of the 7th annual conference on computer graphics and interactive techniques*, Seattle, WA, USA, p. 262-270.
- Broszinsky-Schwabe, E. (2017). *Interkulturelle Kommunikation. Missverständnisse und Verständigung* (2. Aufl.). Wiesbaden: Springer Verlag.
- Brüninglinghaus, C. (2012). Effiziente und recyclinggerechte Montagetechnik. Springer Professional. Zugriff am 06.02.2017: <https://www.springerprofessional.de/automobilproduktion/elektromotor/effiziente-und-recyclinggerechte-montagetechnik/6559272>
- Burke, J. L., Murphy, R.R., Rogers E., Lumelsky V. J. & Scholtz J. (2004). Final report for the DARPA/NSF interdisciplinary study on human-robot interaction. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 34, No. 2, p. 103-112.
- Butler, J.T. & Agah, A. (2001). Psychological Effects of Behavior Patterns of a Mobile Personal Robot. *Autonomous Robots*, Vol. 10, No. 2, p. 185-202.
- Byrnes, N. (2016). Learning to prosper in factory town. *MIT Technology Review*, Vol. 119, No. 6.
- Cakmak, M., Srinivasa, S., Kyung Lee, M., Kiesler, S. & Forlizzi, J. (2011). Using spatial and temporal contrast for fluent robot-human hand-overs. *Proceedings ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Lausanne, Schweiz, p. 489-496.
- CMUSphinx. (2017). About CMUSphinx. Zugriff am 06.03.2017: <http://cmusphinx.sourceforge.net/wiki/about>

- Daimler AG. (2016). Mensch-Roboter-Kooperation im Mercedes-Benz Werk Bremen. Zugriff am 09.04.2017:  
<https://www.youtube.com/watch?v=PBLGCI0H8yo>
- Dautenhahn, K. (2007). Methodology & Themes of Human Robot Interaction: A Growing Research Field. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 4, p.103-108.
- Deuse, J. & Busch, F. (2012). Zeitwirtschaft in der Montage. In Lotter, B. & Wiendahl, H.-P. (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis* (2. Aufl., S. 79-108). Berlin: Springer Vieweg.
- Deuse, J., Weisner, K. Hengstebeck, A. & Busch, F. (2015). Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In Bothhof, A. & Hartmann, E.A. (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit in der Industrie 4.0* (S. 99-109). Berlin: Springer Vieweg.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung - DGUV. (2015). *Kollaborierende Robotersysteme. Planung von Anlagen mit der Funktion Leistungs- und Kraftbegrenzung*. DGUV-Information.
- Diego-Mas, J.-A. & Alcaide-Marzal, J. (2014). Using Kinect sensor in observational methods for assessing postures at work. *Applied Ergonomics*, Vol. 45, No. 4, p. 976-985.
- Diego-Mas, J.-A., Poveda-Bautista, R., & Garzon-Leal, D.-C. (2015). Influences on the use of observational methods by practitioners when identifying risk factors in physical work. *Ergonomics*, Vol. 58, No. 10, p. 1660-1670.
- DIN 33402-2. (2015). *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 10218-1. (2011). *Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 10218-2. (2011). *Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN ISO 12100. (2010). *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 13849-1. (2015). *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 13849-2. (2012). *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-210. (2011). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DLR (2017). Leichtbaurobotik. Zugriff am 08.02.2017:  
<http://www.dlr.de/rmc/rm/de/desktopdefault.aspx/tabid-3803/>
- Duller, C. (2008). *Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R. Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Eaton (2018). Grobhandtaster. Zugriff am 10.10.2018:  
<https://www.automation24.de/fuss-und-grobhandtaster-eaton-229749-fak-s-kc11-i>
- Economist. (2013, 7. September). Working with robots. Our friends electric. Robotics: A new breed of robots is being designed to collaborate with humans, working alongside them to make them more productive. Zugriff am 14.02.2017: <http://www.economist.com/news/technology-quarterly/21584455-robotics-new-breed-robots-being-designed-collaborate-humans>
- EsIMiP. (2017). Effiziente und sichere Interaktion von Menschen und intelligenten Produktionsanlagen. Zugriff am 17.02.2017:  
[https://www.forschungsstiftung.de/index.php/Projekte/Details/\\_EsIMiP-Effiziente-und-sichere-Interaktion-von-Menschen-und-intelligenten-Produktionsanlagen.html](https://www.forschungsstiftung.de/index.php/Projekte/Details/_EsIMiP-Effiziente-und-sichere-Interaktion-von-Menschen-und-intelligenten-Produktionsanlagen.html)

- FAZ Wirtschaft. (2016, 31. Oktober). Chinesischer Gesetzesentwurf. Autohersteller fürchten Elektroauto-Quote. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Zugriff am 14.02.2017: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/neue-mobilitaet/autohersteller-fuerchten-elektroauto-quote-in-china-14505669.html>
- Fischer, K., Jensen, L. C. & Bodenhausen, L. (2014). To Beep or Not to Beep Is Not the Whole Question. *Proceedings of International Conference on Social Robotics (ICSR)*, Sydney, Australien, p.156-165.
- Fong, T., Thorpe, C. & Baur, C. (2003). Collaboration, Dialogue, and Human-Robot Interaction. In Jarvis, R. A. & Zelinsky, A. (Eds.), *Robotics Research. The tenth international symposium* (p. 255-266). Berlin: Springer.
- Franka. (2017). This is Franka. Everybody's Robot. Zugriff am 15.02.2017: <https://www.franka.de/>
- Fraunhofer IPA (2015, 15. Januar). *Presseinformation. Roboter als vielseitiger Gentleman*. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung.
- Fuest, B. (2012). Rede mit mir: BMW mit neuer Spracherkennung. Die Welt Online. Zugriff am 09.02.2017: [https://www.welt.de/print/die\\_welt/motor/article108288846/Rede-mit-mir-BMW-mit-neuer-Spracherkennung.html](https://www.welt.de/print/die_welt/motor/article108288846/Rede-mit-mir-BMW-mit-neuer-Spracherkennung.html)
- Furui, S. (2010). History and development of speech recognition. In Chen, F. & Jokinen, K. (Eds.), *Speech Technology. Theory and Application* (p. 1-18). New York: Springer.
- Gleeson, B., MacLean, K., Haddadi, A., Croft, E. & Alcazar, J. (2013). Gestures for industry. Intuitive human-robot communication from human observation. In Association for Computing Machinery, *Proceedings of the 8th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, Tokio, Japan, p. 349-356.
- Gombolay, M., Huang, C. & Shah, J. (2015). Coordination of human-robot teaming with human task preferences. *Proceedings AAAI Fall Symp. Ser. AI-HRI, Vol. 11*, Arlington, VA, USA, p. 68-73.

- Goodrich, M. & Schultz, A. (2007). Human-robot interaction: a survey. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction, Vol. 1, No. 3*, p. 203-275.
- Goodrich, M., McLain, T., Anderson, J., Sun, J. & Crandall J. (2007). Managing autonomy in robot teams: observations from four experiments. In Association for Computing Machinery, *Proceedings of the Second ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction*, Arlington, VA, USA, p. 25-32.
- Grasso, M. A., Ebert, D. S. & Finin, T.W. (1998). The Integrality of Speech in Multimodal Interfaces. In Association for Computing Machinery, *Transactions on CHI, Vol. 5, No. 4*, p. 303-325.
- Gudehus, T. (2009). *Entwicklung eines Verfahrens zur ergonomischen Bewertung von Montagetätigkeiten durch Motion-Capturing*. Kassel: Kassel University Press GmbH.
- Haag, M. (2015). Kollaboratives Arbeiten mit Robotern - Vision und realistische Perspektive. In Botthof, A. & Hartmann, E.A. (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit in der Industrie 4.0* (S. 59-64). Berlin: Springer Vieweg.
- Hägele, M., Blümlein, N. & Kleine, O. (2011). EFFIROB. *Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung*. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart.
- Hassenzahl, M., Burmeister, M. & Koller, F. (2008). Der User Experience (UX) auf der Spur: Zum Einsatz von www.attrakdiff.de. In Brau, H., Diefenbach, S., Hassenzahl, M., Koller, F., Peissner, M. & Röse, K. (Hrsg.), *Usability Professionals* (S. 78-82). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Hayashi, K., Sakamoto, D., Kanda, T., Shiomi, M., Koizumi, S., Ishiguro H., Ogasawara T. et al. (2007). Humanoid Robots as a Passive-Social Medium - A Field Experiment at a Train Station -. In Association for Computing Machinery, *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Arlington, VA, USA, p. 137-144.

- Henrich, D., Fischer, M., Gecks, T. & Kuhn, S. (2008). Sichere Mensch/Roboter Koexistenz und Kooperation. In Deutsche Gesellschaft für Robotik (Hrsg.), *Robotik 2008* (S. 251-254). Düsseldorf: VDI.
- Hesse, S. (2012). Automatische Montagemaschinen. In Lotter, B. & Wiendahl, H.-P. (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis* (2. Aufl., S. 195-272). Berlin: Springer Vieweg.
- Hoffman, G. (2013). Evaluating fluency in human-robot collaboration. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), Workshop on Human-Robot Collaboration*, Tokio, Japan.
- Hoffman, G. (2019). Evaluating fluency in human-robot collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 49, No. 3, pp. 209-218.
- Hoffman, G. & Breazeal, C. (2007). Cost-based anticipatory action-selection for human-robot fluency. *IEEE Transactions Robotics*, Vol. 23, No. 5, pp. 952-961.
- Hoffman, G. & Breazeal, C. (2010). Effects of anticipatory perceptual simulation on practiced human-robot tasks. *Autonomous Robots*, Vol. 28, No. 4, pp. 403-423.
- Horvath, A., & Greenberg, L. (1989). Development and validation of the working alliance inventory. *Journal of Counseling Psychology*, Vol. 36, No. 2, pp. 223-233.
- Holweg, M. & Pil, F. (2004). *The second century. Reconnecting customer and value chain through build-to-order. Moving beyond mass and lean production in the auto industry*. Cambridge: MIT Press.
- Huang, C., Cakmak, M., Mutlu, B. (2015). Adaptive coordination strategies for human-robot handovers. *Proceedings Robotics: Science and Systems Conference*, Rom, Italien.
- ISO 8373. (2012). *Roboter und Robotikgeräte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO TS 15066. (2016). *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- Joose, M., Sardar, A., Lohse, M. & Evers, V. (2013). BEHAVE-II: The Revised Set of Measures to Assess User's Attitudinal and Behavioral Responses to a Social Robot. *International Journal of Social Robotics, Vol. 5, No. 3*, p. 379-388.
- Jurafsky, D. & Martin, J. H. (2000). *Speech and Language Processing. An introduction to natural language processing, computational linguistics and speech recognition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Berlin: Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft.
- Kaufmann, L., & Rousseeuw, P. J. (2005). *Finding Groups in Data. An introduction to cluster analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Kendon, A. (2004). *Gesture Visible action as utterance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Khan, R. Z. & Ibraheem, N. A. (2012). Hand gesture recognition: a literature review. *International Journal of artificial intelligence & applications, Vol. 3, No. 4*, p. 161-174.
- Khan, Z. (1998). *Attitudes towards Intelligent Service Robots*. Technical Report Interaction and Presentation Laboratory, Report Number TRITA-NA-P9821, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- Klindt, T., Kraus, T., Locquenghien, D. & Ostermann, H. J. (2006). *Die neue EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG*. DIN, VDMA (Hrsg., 2. Aufl.). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Kossmann, M. (2011). *Konzeption und Entwicklung einer MRK-Anwendung für die Motorenmontage in der Fahrzeugindustrie*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität München.

- Krix, P. (2015, 12. Februar). Produktionstechnologie: Roboter gegen Rückenschmerzen. *Automobilwoche*. Zugriff am 14.02.2017: [http://www.automobilwoche.de/article/20150212/NACHRICHTEN/\\_150219970/1276/produktionstechnologie-roboter-gegen-ruckenschmerzen#.VOnaWHyG-ik](http://www.automobilwoche.de/article/20150212/NACHRICHTEN/_150219970/1276/produktionstechnologie-roboter-gegen-ruckenschmerzen#.VOnaWHyG-ik)
- Kropik, M. (2009). *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. Berlin: Springer.
- KUKA. (2017). LBR-iiwa. Zugriff am 08.02.2017: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/lbr-iiwa>
- KUKA DGF. (2019). Sensitives Fügen von Kegelrädern im Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) Betrieb. Zugriff am 14.02.2019: <https://www.youtube.com/watch?time-continue=75&v=3ydf6eJmm9Y>
- KUKA KMR iiwa. (2017). KMR iiwa. Zugriff am 15.02.2017: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/mobilit%C3%A4t/mobile-roboter/kmr-iiwa>
- Kulic, D. & Croft, E. (2006). Physiological and subjective responses to articulated robot motion. *Robotica*, Vol. 25, No. 1, p. 13-27.
- Kunze, T. (2019). *Entwicklung und Evaluierung eines Grobscreenings zur Anwendung von EAWS-Sektion 4 in der Automobilindustrie, Gestaltung hybrider Mensch-Maschine-Systeme*. Springer: Wiesbaden.
- Lasota, P. A. & Shah, J. A. (2015). Analyzing the Effects of Human-Aware Motion Planning on Close-Proximity Human-Robot Collaboration. *Human Factors*, Vol. 57, No. 1, p. 21-33.
- Lauerer, M. (2013). Teurer Eingriff mit Dr. Robo. Spiegel Online. Zugriff am 20.02.2017: <http://www.spiegel.de/gesundheit/diagnose/chirurgie-kritik-an-operations-roboter-davinci-wegen-komplikationen-a-890261.html>
- Lawaczeck, M. (2000). *Zur ergonomischen Beurteilung von Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie*. Stuttgart: Ergon GmbH.

- LeapMotion. (2017). Zugriff am 09.02.2017:  
<https://www.leapmotion.com/product/desktop#106>
- Linde. (2011). Pressepaket. Der blaue Punkt für geräuschlose Sicherheit. Zugriff am 06.03.2017: [http://www.linde-mh.de/de/countrysite/news\\_infoservice\\_1/newspressdetails\\_2693.html](http://www.linde-mh.de/de/countrysite/news_infoservice_1/newspressdetails_2693.html)
- Linguatec. (2017). Spracherkennung. Zugriff am 09.02.2017:  
<http://www.linguatec.de/spracherkennung/>
- LoCoBot. (2017). Low Cost robot Co-Worker. Objectives. Zugriff am 17.02.2017:  
<http://www.locobot.eu/objectives/>
- Logistik Heute. (2018). Routenzüge: BMW geht einen Schritt in Richtung Autonomie. Zugriff am 17.02.2018:  
<https://www.youtube.com/watch?v=1bx6mtaggUo>
- Lohse, M. (2007). *Nutzerfreundliche Mensch-Roboter-Interaktion, Kriterien für die Gestaltung von Personal Service Robots*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller.
- Lotter, B. (2012a). Einführung. In Lotter, B. & Wiendahl, H.-P. (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis* (2. Aufl., S. 1-8). Berlin: Springer Vieweg.
- Lotter, B. (2012b). Manuelle Montage von Kleingeräten. In Lotter, B. & Wiendahl, H.-P. (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis* (2. Aufl., S. 109-146). Berlin: Springer Vieweg.
- Lotter, E. (2012c). Hybride Montagesysteme. In Lotter, B. & Wiendahl, H.-P. (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis* (2. Aufl., S. 167-193). Berlin: Springer Vieweg.
- Lüder, A. (2014). Integration des Menschen in Szenarien der Industrie 4.0. In Bauernhansl, T., Hompel, M. & Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration* (S. 490-507). Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Maier, J. (2017, 12. Januar). Dr. DaVinci, bitte in den OP. Zeit Online. Zugriff am 12.01.2017: [http://www.zeit.de/2017/01/chirurgieroboter%ADdavinci%\\_ADoperation%ADarzt/komplettansicht?print](http://www.zeit.de/2017/01/chirurgieroboter%ADdavinci%_ADoperation%ADarzt/komplettansicht?print)
- Matthias, B. & Ding, H. (2013). *Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage*. Internationales Forum Mechatronik (ifm). Winterthur, Schweiz. Zugriff am 05.01.2017: [https://www.researchgate.net/publication/269410966\\_Die\\_Zukunft\\_der\\_Mensch-Roboter\\_Kollaboration\\_in\\_der\\_industriellen\\_Montage](https://www.researchgate.net/publication/269410966_Die_Zukunft_der_Mensch-Roboter_Kollaboration_in_der_industriellen_Montage)
- Mayer, F. & Pantförder, D. (2014). Unterstützung des Menschen in Cyber-Physical-Production-Systems. In Bauernhansl, T., Hompel, M. & Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), *Ind. 4.0 in Produktion, Autom. und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration* (S. 481-490). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- McNamara, N. & Kirakowski, J. (2006). Functionality, Usability, and User experience: Three Areas of Concern. In Association for Computing Machinery, *Interactions*, Vol. 13, No. 6, p. 26-28.
- Meixner, A. (2014). *Mensch-Roboter-Kooperation in der Automobilendmontage*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- Microsoft Cortana. (2017). Was ist Cortana?. Zugriff am 09.02.2017: <https://support.microsoft.com/de-de/help/17214>
- Microsoft Kinect 2. (2017). Entwickeln mit der Kinect für Windows. Zugriff am 09.02.2017: <https://developer.microsoft.com/de-de/windows/kinect/develop>
- Microsoft. (2017). Improving speech and intent recognition on iOS. Zugriff am 09.02.2017: <https://www.microsoft.com/developerblog/real-life-code/2016/11/18/Improving-speech-and-intent-recognition-on-iOS.html>
- Mitra, S. & Acharya, T. (2007). Gesture Recognition: A Survey. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 37, No. 3, p. 311-324.
- MRKSysteme. (2016). KUKA MRK Landshut. Zugriff am 09.04.2017: <https://www.youtube.com/watch?v=sqrgUn39oPA>

- MTM Datenkarte (2008). *Methods of Time Measurement - Datenkarte*. Deutsche MTM-Vereinigung e.V. Hamburg.
- Murthy, G. R. S. & Jadon, R. S. (2009). A review of vision based hand gesture recognition. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management, Vol. 2, No. 2*, p. 405-410.
- Naumann, M., Dietz, T. & Kuss, A. (2014). Mensch-Maschine-Interaktion. In Bauernhansl, T., Hompel, M. & Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration* (S. 509-523). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. San Diego: Academic Press.
- Nikolaidis, S. & Shah, J.A. (2013). Human-robot cross-training: computational formulation, modeling and evaluation of a human team training strategy. *Proceedings of the International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Tokio, Japan, p. 33-40.
- Norman, D. A. & Nielsen, J. (2010). Gestural Interfaces: A Step Backward in Usability. *Interactions, Vol. 17, No. 5*, p. 46-49.
- Nuance Mix. (2015). Introducing Nuance Mix - An All-New Developer Platform for Consumer Electronics and IoT. Zugriff am 06.03.2017: <http://www.nuance.com/company/news-room/press-releases/nuance-mix-voice-developer-platform.docx>
- Nuance. (2017). Dragon Spracherkennungssoftware. Zugriff am 09.02.2017: <http://www.nuance.de/dragon/index.htm>
- Olbrich, R. (1993). *Aufbau einer Zeitwirtschaft - Beschreibung der Vorgehensweise*. Köln: Wirtschaftsverlag Bachem.
- Olive, J., Christianson, C. & McCary, J. (Eds.). (2011). *Handbook of natural language processing and machine translation. DARPA global autonomous language exploitation*. New York: Springer.

- Onnasch, L., Maier, X. & Jürgensohn, T. (2016). Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Fokus. Dortmund.
- Pershkin, M. & Colgate, J. E. (1999). *Cobots. Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 26, No. 5, p. 335-341.
- Petzelt, D. (2010). *Konzept zur rechnerunterstützten Bestimmung von Sollzeiten in der Montageplanung*. Dissertation. Technische Universität Dortmund. Aachen: Shaker Verlag.
- Pfister, B., Kaufmann, T. (2017). *Sprachverarbeitung. Grundlagen und Methoden der Sprachsynthese und Spracherkennung* (2. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg.
- Pielmeier, B. (2016). *Entwicklung und Integration einer Gestensteuerung für die Mensch Roboter Kooperation*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Ostbayrische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Elektro- und Informationstechnik.
- PRACE. (2017). The Productive Robot Apprentice. Zugriff am 17.02.2017: [http://cordis.europa.eu/project/rcn/101641\\_de.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/101641_de.html)
- Preim, E. & Dachselt, R. (2015). *Interaktive Systeme. Band 2: User Interface Engineering, 3D-Interaktion, Natural User Interface* (2. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.
- Premaratne, P. (2014). *Human Computer Interaction Using Hand Gestures*. Berlin: Springer.
- Produktion SPB. (2017). Cobots bei BMW in Spartanburg. Zugriff am 10.04.2017: [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=4&v=AYV6mYdz7sw](https://www.youtube.com/watch?time_continue=4&v=AYV6mYdz7sw)
- Produktion MUC. (2017). Leichtbau-Roboter bei BMW in München. Zugriff am 10.04.2017: <https://www.youtube.com/watch?v=DsDZxRzgtmA>
- REFA. (1997). *Datenermittlung. Methodenlehre der Betriebsorganisation, Teil 1*. München: Carl Hanser Verlag.

- Reinhard, G. & Rösel, W. (2010). Interaktiver Assistenzroboter in der Montage. Sicherheitsaspekte in der Mensch-Roboter-Kooperation. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 105, No. 1-2, p. 80-83.
- Rethink Robotics. (2017). Zugriff am 08.02.2017: <http://www.rethinkrobotics.com>
- Risak, V. (1986). *Mensch-Maschine-Schnittstelle in Echtzeitsystemen*. Wien: Springer Verlag.
- Robotiq. (2018). Cobots ebook: 7th edition update. Zugriff am 06.07.2018: <http://blog.robotiq.com/collaborative-robot-ebook>
- Rob-at-Work. (2017). Fraunhofer IPA - Inkubator für industrielle Servicerobotik. Zugriff am 09.04.2017: <https://www.youtube.com/watch?v=KU0vakiJarY>
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft No. 38*, p. 193-200.
- Rovetta, A. (2014). Brain flow in application for new robotic polimi platform. In Ceccarelli, M. & Glazunov V. A. (Eds.), *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators: Proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on theory and practice of robots and manipulators*, Moskau, Russland, p.473-482. Cham: Springer Verlag.
- SAP. (2017). Working in the Warehouse of the Future. Zugriff am 09.12.2017: [https://www.youtube.com/watch?v=b42w2\\_N81Ws](https://www.youtube.com/watch?v=b42w2_N81Ws)
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2010). *Arbeitswissenschaft* (3., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl.). Heidelberg: Springer Verlag.
- Schließmann, A. (2014). iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In Bauernhansl, T., Hompel, M. & Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration* (S. 451-480). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schmidler, J., Knott, V. Hoelzl C. & Bengler, K. (2015). Human centered assistance applications for the working environment of the future. *Occupational Ergonomics*, Vol. 12, p. 83-95.

- Scholtz, J. (2003). Theory and Evaluation of Human Robot Interactions. In IEEE Computer Society, *Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences*, Big Island, HI, USA, p. 10-.
- Schuh, G., Brosze, T. & Brandenburg, U. (2012). Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. In Schuh, G. & Stich, V. (Hrsg.), *Produktionsplanung und -steuerung 1* (S. 11-293). Berlin: Springer Vieweg.
- Shah, J.A., Wiken, J., Williams, B. & Breazeal, C. (2011). Improved human-robot team performance using chaski, a human-inspired plan execution system. *Proceedings of the International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Lausanne, Schweiz, p. 29-36.
- Shen, Y. (2015). *System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage*. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag.
- Sheridan, T. (2002). *Humans and Automation: System Design and Research Issues*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- SMErobotics. (2016). Presseinformation zur Automatica 2016. *Flexible Robotersysteme für die digitalisierte Produktion*. Zugriff am 15.02.2017: <http://www.smerobotics.org/AUTOMATICA.html>
- SoftBank Robotics. (2017). Find out more about Pepper. Zugriff am 03.02.2017: <https://www.ald.softbankrobotics.com/en/cool-robots/pepper/find-out-more-about-pepper>
- Spillner, R. (2014). *Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion*. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag.
- Stankevich, L. & Sonkin, K. (2016). Human-Robot Interaction Using Brain-Computer Interface Based on EEG Signal Decoding. In Ronzhin, A., Rigoll, G. & Meshcheryakov R. (Eds.), *Interactive Collaborative Robotics: Proceedings of International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR)*, Budapest, Ungarn, p. 99-106. Basel: Springer International Publishing.

- Steinfeld, A., Fong, T., Kaber, D., Lewis, M., Scholtz J., Schultz A. & Goodrich, M. (2006). Common Metrics for Human-Robot Interaction. In Association for Computing Machinery, *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on human-robot interaction*, Salt Lake City, Utah, USA, p. 33-40.
- Suarez, J. & Murphy, R.R. (2012). Hand gesture recognition with depth images: a review. In IEEE, *2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Paris, Frankreich, p. 411-417.
- Suitable Technologies (2017). Beampro. Zugriff 08.02.2017:  
<https://suitabletech.com/beampro/#whyBeam>
- Takayama, L., Wendy, J. & Nass, C. (2008). Beyond Dirty, Dangerous and Dull: What Everyday People Think Robots Should Do. In Association for Computing Machinery, *Proceedings of the 3rd ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, Amsterdam, Niederlande, p. 25-32.
- Takeda, H., Kobayashi, N., Matsubara, Y. & Nishida T. (1997). Towards Ubiquitous Human-Robot Interaction. In *Working Notes for IJCAI Workshop on Intelligent Multimodal Systems*, Nagoya, Japan, p. 1-8.
- Thiemermann, S. (2005). *Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SARA-Roboter*. Dissertation. Universität Stuttgart. Heidesheim: Jost-Jetter Verlag.
- Thrun, S. (2004). Towards A Framework for Human-Robot Interaction. *Human-Computer Interaction, Vol. 19, No. 1*, p. 9-24.
- Unhelkar, V., Dörr, S., Bubeck, A., Lasota, P., Perez, J., Siu, H. C., Boerkoel, J. C., Tyroller, Q., Bix, J., Bartscher, S. & Shah, J. (2018). Mobile Robots for Moving-Floor Assembly Lines. *IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 25, No.2*, p. 72-81.

- Unhelkar, V., Lasota, P., Tyroller, Q., Buhai, R-D., Marceau, L., Deml, B. & Shah, J. (2018). Human-Aware Robotic Assistant for Collaborative Assembly: Integrating Human Motion Prediction with Planning in Time. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No.3, p. 2394-2401.
- Unhelkar, V., Siu, H. C. & Shah, J. (2014). Comparative performance of human and mobile robotic assistants in collaborative fetch-and-deliver tasks. *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Bielefeld, Deutschland, p. 82-89. New York: Association for Computing Machinery.
- Universal Robots. (2017). About Universal Robots. Zugriff am 08.02.2017: <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/our-history>
- Universal Robots CN. (2017). Cobots enables Xiamen Runner Industrial Corporation to achieve flexible manufacturing. Zugriff am 09.04.2017: <https://www.youtube.com/watch?v=PtnCirKiBXQ>
- Universal Robots IN. (2018). UR10 eliminates level 4 ergonomic risk at L'Oreal India. Zugriff am 09.12.2018: [https://www.youtube.com/watch?v=m1LhIoV\\_HX4](https://www.youtube.com/watch?v=m1LhIoV_HX4)
- Universal Robots POL. (2017). A collaborative robot from Universal Robots polishes. Zugriff am 09.04.2017: <https://www.youtube.com/watch?v=kOPVvYapElQ>
- VDI-Richtlinie 2860. (1990). *Montage und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe Definitionen, Symbole*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Vester, H.-G. (2009). *Kompendium der Soziologie I: Grundbegriffe*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Virzi, R. A. (1992). Refining the test phase of usability evaluation: how many subjects is enough? *Human Factors*, Vol. 34, No. 4, p. 457-468.
- Wachs, J. P., Kölsch, M., Stern, H. & Edan, Y. (2011). Vision-based handgesture applications. *Communications of the Association for Computing Machinery*, Vol. 54, No. 2, p. 60-71.

- Werner, H. (2010). *Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling* (4. Aufl.). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Wu, P. S., Tam, H. Y. & Venuvinod, P. K. (1996). Hybrid assembly. A strategy for expanding the role of „advanced“ assembly technology. *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 22, No. 2, p. 109-122.
- Young, J., Sung, J., Sharlin, A., Igarashi, T., Christensen, H. & Grinter R. (2011). Evaluating Human-Robot Interaction: Focusing on the Holistic Interaction Experience. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 3, No. 1, p. 53-67.
- Zühlke, D. (2012). *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen. Useware-Engineering für technische Systeme* (2., neu bearbeitete Aufl.). Berlin: Springer.



# **A Anhang**

## **A.1 Abbildungen und Tabellen**

Tab. A.1: OWAS-Kodierung der Körperhaltung (Figali et al., 2015)

Köperteil	Kodierung	Körperhaltung
<b>Rücken</b> (Code-Ziffer 1)	1	Gerade
	2	Gebeugt
	3	Gedreht
	4	Gebeugt und Gedreht
<b>Arme</b> (Code-Ziffer 2)	1	Arme unterhalb Schulterhöhe
	2	Eine Arm auf oder über Schulterhöhe
	3	Beide Arme auf oder über Schulterhöhe
<b>Beine</b> (Code-Ziffer 3)	1	Sitzen
	2	Stehen, Beine gerade
	3	Stehen auf einem Bein
	4, 5, 6	Kauernd stehen/knien
	7	Gehen oder bewegen

Tab. A.2: Übersicht über die Aktionskategorien der OWAS-Methode (Gudehus, 2009)

Aktions- kategorie	Bedeutung
1	Die Belastungen durch die Körperhaltungen und die Haltungskombinationen auf das Muskel-Skelett-System sind normal und akzeptabel. Es ist keine Änderung erforderlich.
2	Die Belastungen durch die Körperhaltungen und die Haltungskombinationen können einen gesundheitsgefährdenden Effekt auf das Muskel-Skelett-System haben. Maßnahmen sollten in naher Zukunft ergriffen werden.
3	Die Belastungen durch die Körperhaltungen und die Haltungskombinationen haben einen gesundheitsgefährdenden Effekt auf das Muskel-Skelett-System. Maßnahmen sollten so schnell wie möglich ergriffen werden.
4	Die Belastungen durch die Körperhaltungen und die Haltungskombinationen haben einen sehr gesundheitsgefährdenden Effekt auf das Muskel-Skelett-System. Maßnahmen sollten sofort ergriffen werden.

Tab. A.3: *Bewertungslogik für die Evaluation von Anwendungsfällen*

Kriterium	Bewertungslogik (in %)	
Automatisierungsgrad	Skala:	0-100
	Abstufung:	0, 10, 20,...,90, 100
	Extremwerte:	0 = rein manueller Prozess 100 = vollautomatisierter Prozess
Interaktionsbedarf	Skala:	0-100
	Abstufung:	0, 10, 20,...,90, 100
	Extremwerte:	0 = keine Interaktion, keine wechsels. Beeinfl. 100 = direkte Interaktion, wechsels. Beeinfl. mit gemeinsamen Ziel
Mobilität	Skala:	0-100
	Abstufung:	0, 25, 50, 75, 100
	Kennwerte:	0 = stationärer Roboter
		25 = auf Linearachse fixierter Roboter
		50 = mobiles Robotersystem ohne eig. Antrieb
75 = mobiles Robotersystem mit eig. Antrieb auf festgelegter Route		
100 = mobiles Robotersystem mit eig. Antrieb auf freier Route		
Informationsaustausch	Skala:	0-100
	Abstufung:	0, 10, 20,...,90, 100
	Extremwerte:	0 = kein Informationsaustausch 100 = Mensch und Roboter tauschen über die ges. Prozessdauer Informationen aus
Autonome Entscheidungsfindung	Skala:	0-100
	Abstufung:	0, 10, 20,...,90, 100
	Extremwerte:	0 = Roboter trifft keine eigenst. Entscheidungen 100 = vollautonomes Robotersystem

Tab. A.4: *Potentielle, industrielle MRI-Applikationen zur Klassifizierung und Ableitung generischer Szenarien*

ID-Nr.	Applikationsbez.	Quelle
1	Anrollen Türschallisolierung	Produktion SPB (2017)
2	Kelbststoffapplikation	BMW Leipzig (2017)
3	Flexibles Quality Gate	BMW Dingolfing (2017)
4	Logisitkapplikation mit mob. Rob.	Rob-at-Work (2017)
5	Teilehandling für Prüfumfänge	MRKSysteme (2016)
6	Maschinenbestückung (mit 7. Achse)	Universal Robots CN (2017)
7	Montageapplikation mit mob. Rob.	Unhelkar et. al (2018)
8	Polieren von Oberflächen	Universal Robots POL (2017)
9	Autonomer Routenzug	Logistik Heute (2018)
10	Statische Kommissionierung	Universal Robots IN (2018)
11	Mobile Kommissionierung	SAP (2017)
12	Robotergeführtes Bauteilhandling	Daimler AG (2016)
13	Sensitives Fügen in der Montage	KUKA DGF (2017)
14	Teilebereitstellung (mit 7. Achse)	BMW PS (2016)
15	Dritte Handapplikation	Produktion MUC (2017)

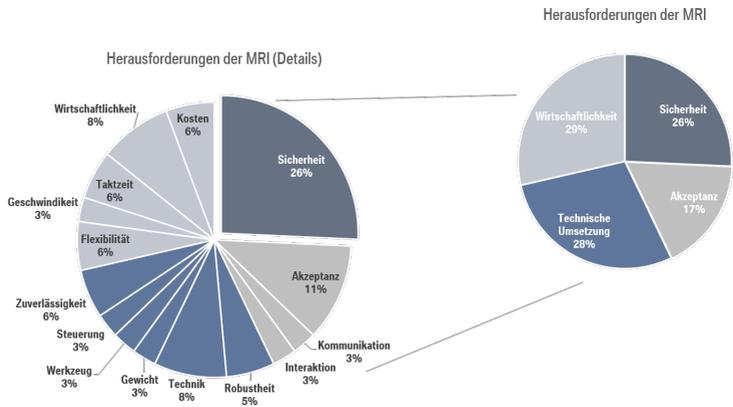


Abb. A.1: Detaillierte Auflistung der über den Fragebogen ermittelten Herausforderungen der MRI.

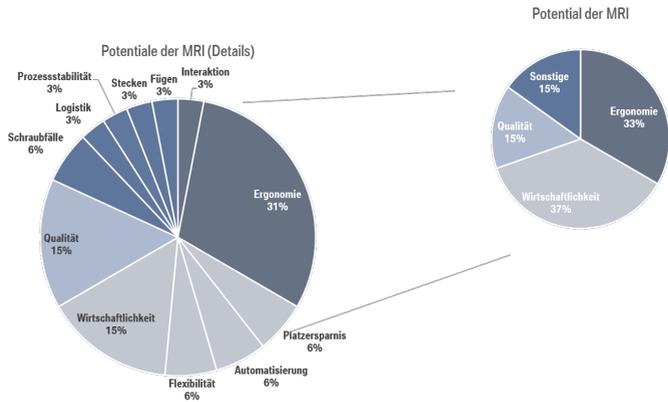


Abb. A.2: Detaillierte Auflistung der über den Fragebogen ermittelten Potentiale der MRI.

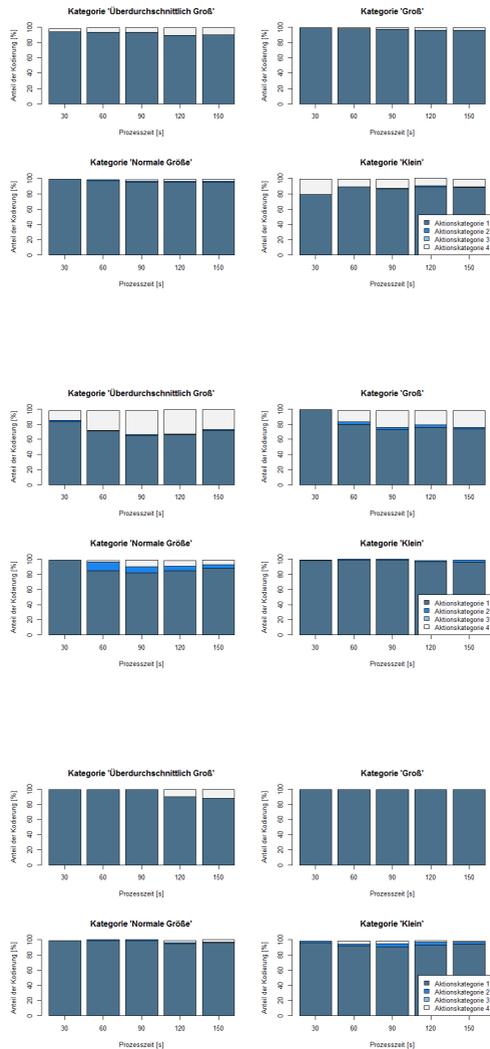


Abb. A.3: Zeitlicher Anteil der OWAS-Aktionskategorien in Bezug auf die Haltung des Rückens in Abhängigkeit der Probandenkategorien *klein*, *normal*, *groß* und *überdurchschnittlich groß* und der Montagekonzepte Handlungs-konzept (oben), Logistik-konzept (Mitte) und Kombikonzept (unten) im 30 Sek. Intervall.

## A.2 Fragebögen

Abb. A.4: Fragebogen zur Bewertung von Potentialen der Mensch-Roboter-Interaktion im industriellen Umfeld (Potentialanalyse, Kap. 3).

ID: \_\_\_\_\_

### Fragebogen zur Bewertung von Potentialen der Mensch-Roboter-Interaktion im industriellen Umfeld

Dieser Fragebogen dient der Datenerhebung auf dem Feld der Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) im industriellen Umfeld. Hierzu werden Experten von Hochschule und Wirtschaft befragt. Der Fragebogen beinhaltet zwei Themenschwerpunkte: Die allgemeine Gestaltung einer MRI im industriellen Umfeld und die Bewertung von drei spezifischer MRI-Szenarien. Die Daten werden vertraulich behandelt und anonymisiert erfasst. Sie dienen ausschließlich der statistischen Datenerhebung.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

#### Fragen zur Bewertung der Mensch-Roboter-Interaktion

##### I. Gestaltung von MRI-Prozessen in der Fertigung

##### a. Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

- i. Welches Potential räumen Sie folgenden menschlichen Modalitäten zur Kommunikation mit einem Roboter im Bereich der industriellen Fertigung ein?

	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering	k. Angabe
Visuelle Wahrnehmung (Sehsinn)	<input type="checkbox"/>					
Auditive Wahrnehmung (Hörsinn)	<input type="checkbox"/>					
Olfaktorische Wahrnehmung (Geruchssinn)	<input type="checkbox"/>					
Gustatorische Wahrnehmung (Geschmackssinn)	<input type="checkbox"/>					
Taktile Wahrnehmung (Tastsinn)	<input type="checkbox"/>					

- ii. Bitte bewerten Sie vor dem Hintergrund der industriellen Fertigung die Eignung der folgenden Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Steuerung eines Roboters.

	Sehr gut	Gut	Eher gut	Eher schlecht	schlecht	k. Angabe
Steuerung über Taster, Schalter oder Buzzer (taktill)	<input type="checkbox"/>					
Sprachsteuerung	<input type="checkbox"/>					
Gestensteuerung (statisch/dynamisch)	<input type="checkbox"/>					
Steuerung über Gesichtserkennung, Mimik und Blickbewegung	<input type="checkbox"/>					
Steuerung über Gedanken	<input type="checkbox"/>					
Steuerung über sensitive Interaktionsflächen (z.B. sensitive Tastbereiche auf der Werkbank)	<input type="checkbox"/>					

##### b. Interaktion im industriellen Umfeld

- i. Bitte bewerten Sie die Bedeutung der folgenden Aspekte in Bezug auf die Akzeptanz einer MRI-Anlage im Fertigungsprozess.

	Sehr hoch	Hoch	Eher hoch	Eher gering	gering	k. Angabe
Abstand zwischen Mensch und Roboter.	<input type="checkbox"/>					
Anmut / Gestalt des Roboters.	<input type="checkbox"/>					
Größe des Roboters.	<input type="checkbox"/>					
Informationsaustausch mit dem Roboter.	<input type="checkbox"/>					
Flüesigkeit der Interaktion zw. Mensch und Roboter	<input type="checkbox"/>					
Reaktionszeit des Robotersystems auf die Befehlseingabe.	<input type="checkbox"/>					

- ii. Wie sollte Ihrer Meinung nach die ideale Interaktion in einem Fertigungsprozess im industriellen Umfeld aussehen?

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. Angabe
Der Mensch übernimmt den aktiven Teil im Prozess, der Roboter den passiven. (Roboter folgt hauptsächlich den Anweisungen des Menschen, der den Prozess steuert)	<input type="checkbox"/>					
Der Menschen übernimmt den passiven Teil im Prozess, der Roboter den aktiven. (Mensch folgt hauptsächlich den Anweisungen des Roboters, der den Prozess steuert)	<input type="checkbox"/>					
Gleichwertige Aufteilung. (weder Mensch noch Roboter aktiv/passiv)	<input type="checkbox"/>					
Über die Interaktion mit dem Roboter wird der Mensch während des Prozesses dezent im Hintergrund unterstützt.	<input type="checkbox"/>					
Die Interaktion mit dem Roboter ist vorrangiger Bestandteil des Prozesses.	<input type="checkbox"/>					

c. Potential der MRI für die industrielle Anwendung

- i. Bitte geben Sie Ihre Einschätzung zu koexistenter und kollaborativer MRI an.

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. Angabe
Der koexistente Betrieb hat eine höhere Anzahl an Einsatzszenarien als der kollaborative.	<input type="checkbox"/>					
Der kollaborative Betrieb hat eine höhere Anzahl an Einsatzszenarien als der koexistente.	<input type="checkbox"/>					
Bei einem kollaborativen Betrieb steigen Anforderungen und Komplexität des Gesamtsystems.	<input type="checkbox"/>					

- ii. Welche Anforderungen / Erwartungen haben Sie an den Einsatz der MRI in der industriellen Montage? Bitte bewerten Sie die jeweiligen Szenarien (koexistent / kollaborativ) getrennt voneinander.

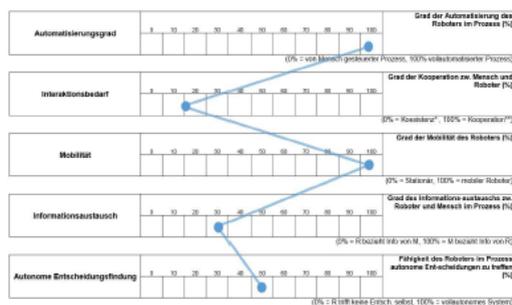
		Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. Angabe
Verbesserung der Qualität	koex.	<input type="checkbox"/>					
	kollab.	<input type="checkbox"/>					
Verbesserung der Ergonomie	koex.	<input type="checkbox"/>					
	kollab.	<input type="checkbox"/>					
Erhöhung der Flexibilität des Prozesses gegenüber einer autom. Montage	koex.	<input type="checkbox"/>					
	kollab.	<input type="checkbox"/>					
Erhöhung der Prozessstabilität	koex.	<input type="checkbox"/>					
	kollab.	<input type="checkbox"/>					
Steigerung der Ressourceneffizienz	koex.	<input type="checkbox"/>					
	kollab.	<input type="checkbox"/>					
Verringerung der Prozesszeit	koex.	<input type="checkbox"/>					
	kollab.	<input type="checkbox"/>					
Sonstige: <input type="text"/>		<input type="checkbox"/>					

## II. Bewertung vordefinierter Szenarien

Die folgenden Einsatzszenarien von Robotern in der Fertigung sind Ergebnis einer durchgeführten Studie, in der verschiedene MRI-fähige Prozesse auf Basis von fünf Kriterien bewertet wurden. Die Ergebnisse wurden klassifiziert und zu drei Szenarien zusammengeführt. Diese dienen im Folgenden als Grundlage der Bewertung.

### a. Szenario 1

Mobile, teilautonome Robotersysteme mit hohem Automatisierungsgrad und geringeren Interaktionsbedarf. (z.B. mobiler Roboter bei Montageapplikationen, autonomer Routenzug)



- i. Bitte bewerten Sie das Szenario hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten in ...

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. Angabe
Roh- / Karosseriebau	<input type="checkbox"/>					
Laackiererei	<input type="checkbox"/>					
Vormontage	<input type="checkbox"/>					
Montage (Fahrzeug)	<input type="checkbox"/>					
Montage (Motor)	<input type="checkbox"/>					
Logistik	<input type="checkbox"/>					

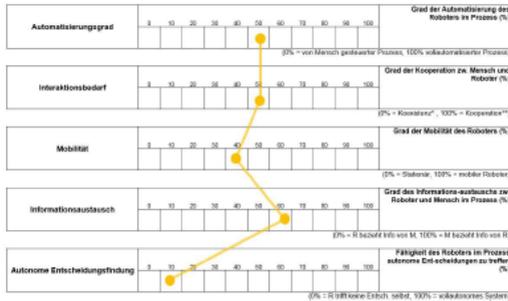
- ii. Bitte bewerten Sie die folgenden Interaktionsschnittstellen hinsichtlich ihrer Eignung in diesem Szenario.

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. Angabe
Visuelle Systeme (z.B. Displays, Projektionen)	<input type="checkbox"/>					
Einfache auditive Systeme (einfach, z.B. Signale, Warntöne).	<input type="checkbox"/>					
Komplexe auditive Systeme (komplex, z.B. Sprachmitteilungen)	<input type="checkbox"/>					
Taktile Systeme (z.B. Vibrationsarmband)	<input type="checkbox"/>					
Für den Einsatz des Robotersystems ist <b>keine</b> Kommunikationsschnittstelle <b>notwendig</b> <sup>1</sup>	<input type="checkbox"/>					
Komplexe Eingabesysteme (z.B. Sprach- / Gestensteuerung etc.)	<input type="checkbox"/>					
Einfache Eingabesysteme (z.B. Taster, Lichtschranken)	<input type="checkbox"/>					
Für den Einsatz des Robotersystems ist <b>kein</b> Eingabesystem <b>notwendig</b> <sup>1</sup>	<input type="checkbox"/>					
Anmerkungen: <input type="text"/>						

(1) Systeme zur Erfüllung der elementaren Sicherheitsfunktionen sowie der Inbetriebnahme werden als gegeben betrachtet.

**b. Szenario 2**

Teilweise mobile Robotersysteme mit einem mittleren Grad an Automatisierung und einem geringen Anteil an Autonomie. Informationsaustausch und Interaktionsbedarf sind hoch. (z.B. Rollwagen mit Roboter-Applikator, Linearachse mit Robotersystem für Montage-/ Teilbereitstellungsapplikationen, Dritte Hand Applikationen)



i. Bitte bewerten Sie das Szenario hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten in ...

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. A. ngabe
Roh- / Karosseriebau	<input type="checkbox"/>					
Lackiererei	<input type="checkbox"/>					
Vormontage	<input type="checkbox"/>					
Montage (Fahrzeug)	<input type="checkbox"/>					
Montage (Motor)	<input type="checkbox"/>					
Logistik	<input type="checkbox"/>					

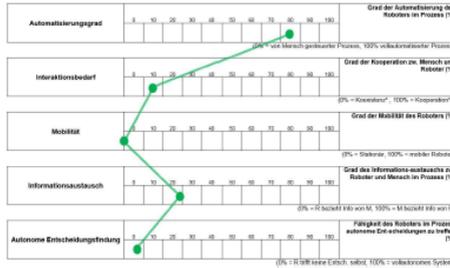
ii. Bitte bewerten Sie die folgenden Interaktionsschnittstellen hinsichtlich ihrer Eignung in diesem Szenario.

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. A. ngabe
Visuelle Systeme (z.B. Displays, Projektionen)	<input type="checkbox"/>					
Einfache auditive Systeme (einfach, z.B. Signale, Warntöne)	<input type="checkbox"/>					
Komplexe auditive Systeme (komplex, z.B. Sprachmittlungen)	<input type="checkbox"/>					
Taktile Systeme (z.B. Vibrationsarmband)	<input type="checkbox"/>					
Für den Einsatz des Robotersystems ist <b>keine</b> Kommunikationsschnittstelle <b>notwendig</b> <sup>1</sup>	<input type="checkbox"/>					
Komplexe Eingabesysteme (z.B. Sprach- / Gestensteuerung etc.)	<input type="checkbox"/>					
Einfache Eingabesysteme (z.B. Taster, Lichtschranken)	<input type="checkbox"/>					
Für den Einsatz des Robotersystems ist <b>kein</b> Eingabesystem <b>notwendig</b> <sup>1</sup>	<input type="checkbox"/>					
Anmerkungen: <input style="width: 100px;" type="text"/>						

<sup>(1)</sup> Systeme zur Erfüllung der elementaren Sicherheitsfunktionen sowie der Inbetriebnahme werden als gegeben betrachtet.

c. Szenario 3

Hochautomatisierte, immobile und nicht autonome Robotersysteme mit geringeren Interaktionsbedarf und Informationsaustausch. (z.B. Anrollroboter, Scheibenkleben, Kommissionier-Applikationen)



i. Bitte bewerten Sie das Szenario hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten in ...

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. Angabe
Roh- / Karosseriebau	<input type="checkbox"/>					
Lackiererei	<input type="checkbox"/>					
Vormontage	<input type="checkbox"/>					
Montage (Fahrzeug)	<input type="checkbox"/>					
Montage (Motor)	<input type="checkbox"/>					
Logistik	<input type="checkbox"/>					

ii. Bitte bewerten Sie die folgenden Interaktionsschnittstellen hinsichtlich ihrer Eignung in diesem Szenario.

	Trifft voll zu	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu	k. Angabe
Visuelle Systeme (z.B. Displays, Projektionen)	<input type="checkbox"/>					
Einfache auditive Systeme (einfach, z.B. Signale, Warntöne)	<input type="checkbox"/>					
Komplexe auditive Systeme (komplex, z.B. Sprachmitteilungen)	<input type="checkbox"/>					
Taktile Systeme (z.B. Vibrationsarmband)	<input type="checkbox"/>					
Für den Einsatz des Robotersystems ist <b>keine</b> Kommunikationsschnittstelle notwendig <sup>1)</sup>	<input type="checkbox"/>					
Komplexe Eingabesysteme (z.B. Sprach- / Gestensteuerung etc.)	<input type="checkbox"/>					
Einfache Eingabesysteme (z.B. Taster, Lichtschranken)	<input type="checkbox"/>					
Für den Einsatz des Robotersystems ist <b>kein</b> Eingabesystem notwendig <sup>1)</sup>	<input type="checkbox"/>					
Anmerkungen: <input type="text"/>						

(1) Systeme zur Erfüllung der elementaren Sicherheitsfunktionen sowie der Inbetriebnahme werden als gegeben betrachtet.

III. Allgemeine Fragen

a. Was ist Ihrer Meinung nach die größte Herausforderung bei der Umsetzung von Mensch-Roboter-Kollaborations-Prozessen im industriellen Umfeld der Montage?

b. Was ist Ihrer Meinung nach das größte Potential von Mensch-Roboter-Kollaborations-Prozessen in der Montage?

Abb. A.5: Fragebogen zur Bewertung des Effekts einer informativen Mensch-Roboter-Schnittstelle in der industriellen Fertigung (Techn. Schnittstellevaluation, Kap. 5).

**Fragebogen zur Bewertung der Informationsübermittlung im Rahmen der Mensch-Roboter-Interaktion (MRI)**

Fragebogen-Nr. (nicht ausfüllen)

Sehr geehrte Damen und Herren,

Im Folgenden werden Ihnen Fragen zu Ihrer persönlichen Wahrnehmung und Ihrem Befinden in der Nähe eines Leichtbauroboters gestellt. Diese bilden die Grundlage für die Gestaltung einer späteren MRI-Applikation in der Fertigung, in dem Vor- und Nachteile der MRI in einem Arbeitsprozess untersucht werden sollen. Die Daten werden vertraulich behandelt und anonymisiert erfasst. Sie dienen ausschließlich der späteren statistischen Auswertung.

**Teil I - Effekt eines bewegten Robotersystems (ohne Zustandsinformation)**

**I.1 Wahrnehmung des Roboters**  
 Der Roboter verfährt auf verschiedene Positionen, Abstände und Anfahrtswinkel sowie mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zum Probanden. Bitte bewerten Sie die einzelnen Faktoren nach Ihrer persönlichen Wahrnehmung.

		angenehm	akzeptabel	unangenehm	abstoßend	verfügungsgemäß	keine Angabe
<b>I.1.1 Bewegungsablauf 1</b>							
i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition (Kopf) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition (Brust) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
<b>I.1.2 Bewegungsablauf 2</b>							
i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition (Kopf) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition (Brust) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
<b>I.1.3 Bewegungsablauf 3</b>							
i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition (Kopf) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition (Brust) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
<b>I.1.4 Bewegungsablauf 4</b>							
i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition (Kopf) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition (Brust) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					

**1.1.5 Bewegungsablauf 5**

i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Kopf</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Brust</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					

**1.1.6 Bewegungsablauf 6**

i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Kopf</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Brust</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					

**1.1.7 Bewegungsablauf 7**

i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Kopf</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Brust</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					

**1.1.8 Bewegungsablauf 8**

i	Wie empfinden Sie die Geschwindigkeit in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
ii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Kopf</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iii	Wie empfinden Sie die Endposition ( <b>Brust</b> ) in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
iv	Wie empfinden Sie den Abstand zum Roboter in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					
v	Wie empfinden Sie den Anfahrtswinkel des Roboters in dieser Situation?	<input type="checkbox"/>					

**1.2 Allgemeine Bewertung**

**1.2.1** Bitte bewerten Sie die folgenden Faktoren nach der Wichtigkeit für Ihr Wohlbefinden in der Nähe des Robotersystems.

i	Geschwindigkeit des Systems	<input type="checkbox"/>					
ii	Abstand zu dem System	<input type="checkbox"/>					
iii	Bewegungsbahn des Systems	<input type="checkbox"/>					
iv	Information über das (zukünftige) Verhalten des Roboters	<input type="checkbox"/>					
v	Die Höhe der Endposition des Roboters	<input type="checkbox"/>					

sehr wichtig  
wichtig  
eher wichtig  
eher unwichtig  
unwichtig  
bedeutungslos  
keine Angabe

**1.2.2 Anmerkungen**

**Teil II - Effekt eines bewegten Robotersystems (mit Zustandsinformation)**

**II.1 Wahrnehmung des Roboters**

Die vorherigen Tests werden nun mit Unterstützung durch visuelle und auditive Interaktionsmodule durchgeführt, um den Menschen über den Zustand des Roboters zu informieren. Bitte bewerten Sie die einzelnen Informationsmodule nach Ihrer persönlichen Wahrnehmung.

		Ja	Nein	Falls ja: angenehmer unangenehmer	keine Angabe
<b>II.1.1 Informationsmodul I</b>					
i	Ändert sich Ihre Empfindung der Geschwindigkeit im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Kopf) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Brust) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iv	Ändert sich Ihre Empfindung des Abstands im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
v	Ändert sich Ihre Empfindung des Anfahrwinkels im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>II.1.2 Informationsmodul II</b>					
i	Ändert sich Ihre Empfindung der Geschwindigkeit im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Kopf) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Brust) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iv	Ändert sich Ihre Empfindung des Abstands im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
v	Ändert sich Ihre Empfindung des Anfahrwinkels im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>II.1.6 Informationsmodul III</b>					
i	Ändert sich Ihre Empfindung der Geschwindigkeit im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Kopf) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Brust) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iv	Ändert sich Ihre Empfindung des Abstands im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
v	Ändert sich Ihre Empfindung des Anfahrwinkels im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>II.1.7 Informationsmodul IV</b>					
i	Ändert sich Ihre Empfindung der Geschwindigkeit im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Kopf) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Brust) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iv	Ändert sich Ihre Empfindung des Abstands im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
v	Ändert sich Ihre Empfindung des Anfahrwinkels im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>II.1.8 Informationsmodul V</b>					
i	Ändert sich Ihre Empfindung der Geschwindigkeit im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Kopf) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iii	Ändert sich Ihre Empfindung der Endposition (Brust) im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iv	Ändert sich Ihre Empfindung des Abstands im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
v	Ändert sich Ihre Empfindung des Anfahrwinkels im Vergleich zur vorherigen Situation ohne IA-Module.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Abb. A.6: Fragebogen zur Bewertung der ergonomischen und praktischen Anwendbarkeit der Mensch-Roboter-Interaktion in einem exemplarischen Montageprozess (Versuch 1, Kap. 6).

**Fragebogen zur Bewertung der ergonomischen und praktischen Anwendbarkeit der Mensch-Roboter-Interaktion in einem exemplarischen Montageprozess**

Fragebogen-ID

Sehr geehrte Damen und Herren,

Im Folgenden werden Ihnen Fragen zu Ihrer persönlichen Einschätzung der Zusammenarbeit mit einem Roboter gestellt, anhand derer Sie drei unterschiedliche Montagekonzepte bewerten. Die Evaluation zielt darauf ab, Ihre Wahrnehmung der Steuerung des Prozesses und des Verhaltens des Roboters, sowie die Kooperation mit dem Roboter über verschiedene Interaktionsmodule zu ermitteln. Im letzten Teil werden Sie gebeten Aussagen über die von Ihnen empfundene physische und psychische Beanspruchung durch den Arbeitsprozess zu treffen. Bitte beantworten Sie die Fragen möglichst vollständig und ehrlich. Die Daten werden anonymisiert erfasst und vertraulich behandelt. Sie dienen ausschließlich der späteren statistischen Auswertung.

**A ARBEITSPROZESS**

**A1 Steuerbarkeit des Prozessgeschehens**

A1.1	Bitte bewerten Sie Ihre Einflussmöglichkeit auf das Prozessgeschehen.								
A1.2	Wie verlässlich ist die Steuerung des Prozessgeschehens?	Geste							
		Buzzer							
A1.3	Halten Sie die Steuerung des Prozessgeschehens über einen längeren Zeitraum für geeignet?	Geste							
		Buzzer							

sehr gut  
 gut  
 eher gut  
 eher schlecht  
 schlecht  
 sehr schlecht

**Handlingkonzept (K1)**

**A2.1 Arbeitsaufteilung in K1**

A2.1.1 Die Arbeitsaufteilung zwischen Ihnen und dem Roboter in K1 ist...

A2.1.2 Bewerten Sie bitte den Arbeitsanteil des Roboters in K1 auf folgender Skala zwischen 0% bis 100%!

0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<input type="checkbox"/>										

(0% = rein manueller Prozess, 100% = vollautomatisierter Prozess)

A2.1.3 Sollte der Arbeitsanteil des Roboters in K1 verändert werden?

<input type="checkbox"/> stark erhöht	<input type="checkbox"/> erhöht	<input type="checkbox"/> keine Veränderung	<input type="checkbox"/> verringert	<input type="checkbox"/> stark verringert
---------------------------------------	---------------------------------	--	-------------------------------------	---

<b>A2.2 Prozessuale Partnerschaft in K1</b>		
A2.2.1	Der Roboter steht im Fokus der Tätigkeit.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.2.2	Der Mensch steht im Fokus der Tätigkeit.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.2.3	Die Zusammenarbeit im Prozess kann als ebenbürtige Partnerschaft bezeichnet werden.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

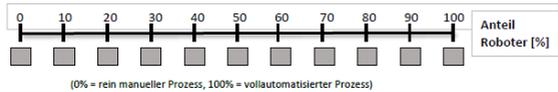
trifft voll zu  
trifft zu  
trifft eher zu  
trifft eher nicht zu  
trifft nicht zu  
trifft überhaupt nicht zu

<b>A2.3 Kollaboration in K1</b>		
A2.3.1	Die <b>Robotergeschwindigkeit</b> ermöglicht eine flüssige Kollaboration mit dem Roboter.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.2	Haben Sie das Gefühl zu lange <b>Wartezeiten</b> im Prozess gehabt zu haben?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.3	Ist der Roboter ein <b>vertrauenswürdiger</b> Partner in K1? Fühlen Sie sich vor Verletzungen sicher und vertrauen Sie dem Roboter?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.4	Ist der Roboter ein <b>zuverlässiger</b> Partner in K1? Ist der Roboter dann bereit, wenn Sie ihn benötigen?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.5	In K1 arbeiten der Roboter und ich <b>flüssig im Team</b> zusammen.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.6	Die Zusammenarbeit mit dem Roboter wirkt sich <b>positiv auf das Gesamtergebnis</b> aus.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.7	Der Einsatz von <b>Interaktionsmodulen</b> wirkt sich <b>positiv</b> auf die Zusammenarbeit aus.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.8	Die <b>Interaktionsmodule</b> helfen mir dabei den Roboter zu <b>verstehen</b> .	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A2.3.9	Ich habe das Gefühl den/die <b>nächsten Schritt(e) des Roboters zu kennen</b> .	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

**Logistikkonzept (K2)**

<b>A3.1 Arbeitsaufteilung in K2</b>		
A3.1.1	Die Arbeitsaufteilung zwischen Ihnen und dem Roboter in K2 ist...	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.1.2	Bewerten Sie bitte den Arbeitsanteil des Roboters in K2 auf folgender Skala zwischen 0% bis 100%!	

sehr gut  
gut  
eher gut  
eher schlecht  
schlecht  
sehr schlecht



(0% = rein manueller Prozess, 100% = vollautomatisierter Prozess)

A3.1.3 Sollte der Arbeitsanteil des Roboters in K2 verändert werden?	
<input type="checkbox"/> stark erhöht	<input type="checkbox"/> erhöht
<input type="checkbox"/> keine Veränderung	<input type="checkbox"/> verringert
<input type="checkbox"/> stark verringert	

A3.2 Prozessuale Partnerschaft in K2		
A3.2.1	Der Roboter steht im Fokus der Tätigkeit.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.2.2	Der Mensch steht im Fokus der Tätigkeit.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.2.3	Die Zusammenarbeit im Prozess kann als ebenbürtige Partnerschaft bezeichnet werden.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3 Kollaboration in K2		
A3.3.1	Die <b>Roboterschwindigkeit</b> ermöglicht eine flüssige Kollaboration mit dem Roboter.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.2	Haben Sie das Gefühl zu lange <b>Wartezeiten</b> im Prozess gehabt zu haben?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.3	Ist der Roboter ein <b>vertrauenswürdiger</b> Partner in K2? Fühlen Sie sich vor Verletzungen sicher und vertrauen Sie dem Roboter?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.4	Ist der Roboter ein <b>zuverlässiger</b> Partner in K2? Ist der Roboter dann bereit, wenn Sie ihn benötigen?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.5	In K2 arbeiten der Roboter und ich <b>flüssig im Team</b> zusammen.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.6	Die Zusammenarbeit mit dem Roboter wirkt sich <b>positiv auf das Gesamtergebnis</b> aus.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.7	Der Einsatz von <b>Interaktionsmodulen</b> wirkt sich <b>positiv</b> auf die Zusammenarbeit aus.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.8	Die <b>Interaktionsmodule</b> <b>helfen</b> mir dabei den Roboter <b>zu verstehen</b> .	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A3.3.9	Ich habe das Gefühl den/die <b>nächsten Schritt(e) des Roboters zu kennen</b> .	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

trifft voll zu  
 trifft zu  
 trifft eher zu  
 trifft eher nicht zu  
 trifft nicht zu  
 trifft überhaupt nicht zu

**Kombikonzep (K3)**

A4.1 Arbeitsaufteilung in K3		
A4.1.1	Die Arbeitsaufteilung zwischen Ihnen und dem Roboter in K3 ist...	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
A4.1.2	Bewerten Sie bitte den Arbeitsanteil des Roboters in K3 auf folgender Skala zwischen 0% bis 100%!	

(0% = rein manueller Prozess, 100% = vollautomatisierter Prozess)

A4.1.3 Sollte der Arbeitsanteil des Roboters in K3 verändert werden?	
<input type="checkbox"/> stark erhöht	<input type="checkbox"/> erhöht
<input type="checkbox"/> keine Veränderung	<input type="checkbox"/> verringert
<input type="checkbox"/> stark verringert	

sehr gut  
 gut  
 eher gut  
 eher schlecht  
 schlecht  
 sehr schlecht

		trifft voll zu	trifft zu	trifft eher zu	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
<b>A4.2 Prozessuale Partnerschaft in K3</b>							
A4.2.1	Der Roboter steht im Fokus der Tätigkeit.	<input type="checkbox"/>					
A4.2.2	Der Mensch steht im Fokus der Tätigkeit.	<input type="checkbox"/>					
A4.2.3	Die Zusammenarbeit im Prozess kann als ebenbürtige Partnerschaft bezeichnet werden.	<input type="checkbox"/>					
<b>A4.3 Kollaboration in K3</b>							
A4.3.1	Die <i>Robotergeschwindigkeit</i> ermöglicht eine flüssige Kollaboration mit dem Roboter.	<input type="checkbox"/>					
A4.3.2	Haben Sie das Gefühl zu lange <i>Wartezeiten</i> im Prozess gehabt zu haben?	<input type="checkbox"/>					
A4.3.3	Ist der Roboter ein <i>vertrauenswürdiger</i> Partner in K3? Fühlen Sie sich vor Verletzungen sicher und vertrauen Sie dem Roboter?	<input type="checkbox"/>					
A4.3.4	Ist der Roboter ein <i>zuverlässiger</i> Partner in K3? Ist der Roboter dann bereit, wenn Sie ihn benötigen?	<input type="checkbox"/>					
A4.3.5	In K3 arbeiten der Roboter und ich <i>flüssig im Team</i> zusammen.	<input type="checkbox"/>					
A4.3.6	Die Zusammenarbeit mit dem Roboter wirkt sich <i>positiv auf das Gesamtergebnis</i> aus.	<input type="checkbox"/>					
A4.3.7	Der Einsatz von <i>Interaktionsmodulen</i> wirkt sich <i>positiv</i> auf die Zusammenarbeit aus.	<input type="checkbox"/>					
A4.3.8	Die <i>Interaktionsmodule</i> <i>helfen</i> mir dabei den Roboter zu <i>verstehen</i> .	<input type="checkbox"/>					
A4.3.9	Ich habe das Gefühl den/die <i>nächsten Schritt(e)</i> des Roboters zu <i>kennen</i> .	<input type="checkbox"/>					
A4.3.10	Das <i>Zusammenwirken der beiden Roboter</i> in K3 ist flüssig.	<input type="checkbox"/>					

**A5 Gesamtbewertung Arbeitskonzept**

A5.1 Welches Arbeitskonzept halten Sie für am besten geeignet? Warum?

**B INTERAKTIONSMODULE**

**B1 Aktiv - Steuerung**

B1.1	Bewerten Sie die Eignung als intuitives Steuerungskonzept.	Geste	<input type="checkbox"/>						
		Buzzer	<input type="checkbox"/>						

sehr gut  
gut  
eher gut  
eher schlecht  
schlecht  
sehr schlecht

**B2 Passiv - Informationsmodule**

*Anmerkung: Nach dem Zufallsprinzip werden bei der Hälfte aller Arbeitsaufgaben die optionalen Informationsmodule ausgeschaltet.*

B2.1	Das Interaktionsmodul ist geeignet mich über die <b>Montageschritte</b> zu informieren.	Beamer	<input type="checkbox"/>						
		Bildschirm	<input type="checkbox"/>						
		Lautsprecher	<input type="checkbox"/>						
		Leuchtringe	<input type="checkbox"/>						
B2.2	Das Interaktionsmodul ist geeignet mich über den <b>Zustand des Roboters</b> zu informieren.	Beamer	<input type="checkbox"/>						
		Bildschirm	<input type="checkbox"/>						
		Lautsprecher	<input type="checkbox"/>						
		Leuchtringe	<input type="checkbox"/>						
B2.3	Eine dauerhafte <b>Unterstützung</b> durch das Interaktionsmodul kann ich mir vorstellen.	Beamer	<input type="checkbox"/>						
		Bildschirm	<input type="checkbox"/>						
		Lautsprecher	<input type="checkbox"/>						
		Leuchtringe	<input type="checkbox"/>						
B2.4	Finden Sie die Informationsbereitstellung durch das Interaktionsmodul <b>angenehm</b> ?	Beamer	<input type="checkbox"/>						
		Bildschirm	<input type="checkbox"/>						
		Lautsprecher	<input type="checkbox"/>						
		Leuchtringe	<input type="checkbox"/>						

viel zu viele  
zu viele  
eher zu viele  
eher zu wenige  
zu wenige  
viel zu wenige

B2.5	Stellt das Interaktionsmodul zu <b>viele oder zu wenige Informationen</b> bereit?	Beamer	<input type="checkbox"/>						
		Bildschirm	<input type="checkbox"/>						
		Lautsprecher	<input type="checkbox"/>						
		Leuchtringe	<input type="checkbox"/>						

B2.7 Welche weiteren Informationen/Informationsmodule wünschen Sie sich?

**B3 Wahrnehmung**

B3.1	Welche <b>Farbe</b> und welches <b>Muster</b> haben die Leuchtringe bei den folgenden Prozess-abschnitten? <i>(jeweils 2 Nennungen bei B3.1.1, B3.1.2 und B3.1.3)</i>				
B3.1.1	<input type="checkbox"/> rot	<input type="checkbox"/> blau	<input type="checkbox"/> grün	<input type="checkbox"/> gelb	Roboter ist in Bewegung
	<input type="checkbox"/> pulsierend	<input type="checkbox"/> rotierend	<input type="checkbox"/> blinkend	<input type="checkbox"/> konstant	
B3.1.2	<input type="checkbox"/> rot	<input type="checkbox"/> blau	<input type="checkbox"/> grün	<input type="checkbox"/> gelb	Roboter scannt
	<input type="checkbox"/> pulsierend	<input type="checkbox"/> rotierend	<input type="checkbox"/> blinkend	<input type="checkbox"/> konstant	
B3.1.3	<input type="checkbox"/> rot	<input type="checkbox"/> blau	<input type="checkbox"/> grün	<input type="checkbox"/> gelb	Roboter übergibt Bauteil
	<input type="checkbox"/> pulsierend	<input type="checkbox"/> rotierend	<input type="checkbox"/> blinkend	<input type="checkbox"/> konstant	
B3.2	In welchem Konzept haben Sie die grüne Schrift der Prozessanweisung des Beamers gesehen?				
	<input type="checkbox"/> In K1	<input type="checkbox"/> In K2	<input type="checkbox"/> In K3	<input type="checkbox"/> In keinem der Konzepte	
B3.3	Haben Sie das Bild auf dem Bildschirm wahrgenommen, wenn ja welche Farbe hatte dieses?				
	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja =>	<input type="checkbox"/> gelb	<input type="checkbox"/> blau	<input type="checkbox"/> rot
B3.3	Haben Sie das Warnblinken beim Einfahren des Turboladers wahrgenommen, wenn ja welche Farbe hatte dieses?				
	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja =>	<input type="checkbox"/> gelb	<input type="checkbox"/> blau	<input type="checkbox"/> rot
B3.4	Was teilt Ihnen der Lautsprecher mit, wenn der Roboter die Dichtung des Turboladers prüft?				
B3.4.1	"Der Roboter prüft nun den QR-Code des Turboladers!"				<input type="checkbox"/>
B3.4.2	"Der Roboter prüft nun die Dichtung der Ölrücklaufleitung!"				<input type="checkbox"/>
B3.4.3	"Achtung! Die Dichtung des Kühlschlauchs wird nun geprüft!"				<input type="checkbox"/>
B3.4.4	Ich habe die Ansage nicht aktiv wahrgenommen, bzw. mir nicht gemerkt!				<input type="checkbox"/>

**C ERGONOMIE**

**Handlingkonzept (K1)**

**C1 Ergonomie in K1**

C1.1	Veränderung der <i>körperlichen Beanspruchung</i> in K1 im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Kraftaufwand	<input type="checkbox"/>	nimmt stark zu nimmt zu nimmt eher zu nimmt eher ab nimmt ab nimmt stark ab
		Körperhaltung	<input type="checkbox"/>	
C1.2	Veränderung der <i>psychischen Beanspruchung</i> durch die Arbeitsaufgabe in K1 im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Zeitdruck	<input type="checkbox"/>	
		Komplexität	<input type="checkbox"/>	

**Logistikkonzept (K2)**

**C2 Ergonomie in K2**

C2.1	Veränderung der <i>körperlichen Beanspruchung</i> in K2 im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Kraftaufwand	<input type="checkbox"/>
		Körperhaltung	<input type="checkbox"/>
C2.2	Veränderung der <i>psychischen Beanspruchung</i> durch die Arbeitsaufgabe in K2 im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Zeitdruck	<input type="checkbox"/>
		Komplexität	<input type="checkbox"/>

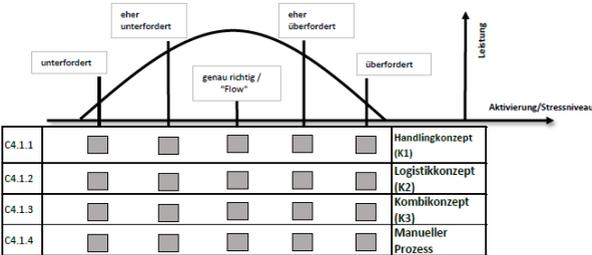
**Kombikonzept (K3)**

**C3 Ergonomie in K3**

C3.1	Veränderung der <i>körperlichen Beanspruchung</i> in K3 im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Kraftaufwand	<input type="checkbox"/>
		Körperhaltung	<input type="checkbox"/>
C3.2	Veränderung der <i>psychischen Beanspruchung</i> durch die Arbeitsaufgabe in K3 im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Zeitdruck	<input type="checkbox"/>
		Komplexität	<input type="checkbox"/>

**C4**

C4.1 Wie bewerten Sie das Stresslevel während des Prozesses im Hinblick auf Ihre Leistung?



**D Ihre Meinung**

Im unteren Feld haben Sie die Möglichkeit Anmerkungen (Feedback, Verbesserungsvorschläge, Ideen) aufzuführen. Wie hat es Ihnen gefallen mit dem Roboter zusammenzuarbeiten?

Abb. A.7: Fragebogen zur ergonomischen und praktischen Bewertung der Mensch-Roboter-Interaktion in einem exemplarischen Montageprozess mit Fokus auf die Schnittstelle (Versuch 2, Kap. 6).

**Fragebogen zur Bewertung der ergonomischen und praktischen Anwendbarkeit der Mensch-Roboter-Interaktion in einem exemplarischen Montageprozess**

Fragebogen-ID

Sehr geehrte Teilnehmer,  
bei diesem Experiment handelt es sich um eine Nachfolgeuntersuchung einer Ihnen bereits bekannten und durchgeführten Studie. Dabei sind zwei Montagekonzepte optimiert worden und die Steuerungskonzepte Buzzer und Geste werden um eine dritte, die Sprachsteuerung erweitert. Ziel des Fragebogens ist zum einen die Steuerungskonzepte untereinander zu evaluieren und zum anderen eventuelle Auswirkungen der Sprachsteuerung auf den Montageprozess aufzuzeigen.

**A1 Mensch-Roboter-Schnittstelle**

A1 Steuerbarkeit des Prozessgeschehens		sehr gut	gut	eher gut	eher schlecht	schlecht	sehr schlecht
A1.1	Bitte bewerten Sie Ihre Einflussmöglichkeit auf das Prozessgeschehen.	<input type="checkbox"/>					
A1.2	Wie verlässlich ist die Steuerung des Prozessgeschehens?	Buzzersteuer.	<input type="checkbox"/>				
		Gestensteuer.	<input type="checkbox"/>				
		Sprachsteuer.	<input type="checkbox"/>				
A1.3	Halten Sie die Steuerung des Prozessgeschehens über einen längeren Zeitraum für geeignet?	Buzzersteuer.	<input type="checkbox"/>				
		Gestensteuer.	<input type="checkbox"/>				
		Sprachsteuer.	<input type="checkbox"/>				

**A2 Evaluation der Steuerungsschnittstelle zw. Mensch und Roboter**

A2		trifft voll zu	trifft zu	trifft eher zu	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	trifft überhaupt n. zu
A2.1	Stellt die Antwortzeit der Steuerungsschnittstelle für Sie eine wichtige Größe bei der Zusammenarbeit mit dem Roboter dar?	<input type="checkbox"/>					
A2.2	Empfinden Sie eine längere Wartezeit auf die Reaktion des Systems nach ihrer Eingabe als unangenehm / störend? Im Folgenden werden die Steuerungsschnittstellen evaluiert, bitte bewerten Sie diese anhand der Schulnotenskala von 1 bis 6.	<input type="checkbox"/>					
A.2.3	Bitte bewerten Sie die Steuerungsschnittstelle hinsichtlich ihrer Fehleranfälligkeit.  (1= nicht fehleranfällig; ...; 6= äußerst fehleranfällig)	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				
A2.4	Bitte bewerten Sie die Steuerungsschnittstellen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit im Prozess.  (1= sehr zuverlässig; ...; 6= nicht zuverlässig)	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				
A2.5	Bitte bewerten Sie die Steuerungsschnittstellen hinsichtlich einer flüssigen Zusammenarbeit mit dem Roboter?  (1= sehr flüssige Z.; ...; 6= sehr stockende Z.)	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				

		1	2	3	4	5	6
A2.6	Bitte bewerten Sie die Reaktions- / Antwortzeit der Steuerschnittstelle auf ihre Eingaben.	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				
A2.7	Bitte bewerten Sie die Schnittstellen hinsichtlich ihrer (positiven) Auswirkung auf das Gesamtergebn.  (1= sehr gut A.; ... ; 6= sehr schlechte A.)	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				
A2.8	Bitte bewerten Sie die Schnittstellen nach Ihrer Intuitivität / Einfachheit der Bedienung.  (1= sehr intuitiv; ... ; 6= nicht intuitiv)	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				
A2.9	Bitte bewerten Sie die Schnittstellen bezüglich ihrer Praktikabilität. Sind diese angenehm zu bedienen?  (1= sehr angenehm/praktisch; ... ; 6= unangenehm/unpraktisch)	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				
A2.10	Bitte geben Sie an, wie gut die Steuerungsschnittstelle allgemein mit den Interaktionsmodulen harmoniert.  (1= sehr gut; ... ; 6= schlecht)	Buzzer	<input type="checkbox"/>				
		Geste	<input type="checkbox"/>				
		Sprache	<input type="checkbox"/>				

A2.11 Falls eine Schnittstelle Ihrer Meinung nach besonders gut oder schlecht geeignet ist, geben Sie bitte den Grund dafür an:

**B MRI Montage-Konzepte**

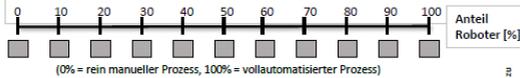
**B1 Prozessuale Partnerschaft**

B1.1	Die Arbeitsaufteilung zwischen Ihnen und dem Roboter in ... ist.	K1opt	<input type="checkbox"/>				
		K3opt	<input type="checkbox"/>				
B1.2	Der Roboter steht im Fokus der Tätigkeit.	K1opt	<input type="checkbox"/>				
		K3opt	<input type="checkbox"/>				
B1.3	Der Mensch steht im Fokus der Tätigkeit.	K1opt	<input type="checkbox"/>				
		K3opt	<input type="checkbox"/>				
B1.4	Die Zusammenarbeit im Prozess kann als ebenbürtige Partnerschaft bezeichnet werden.	K1opt	<input type="checkbox"/>				
		K3opt	<input type="checkbox"/>				

trifft voll zu / sehr gut  
 trifft zu / gut  
 trifft eher zu / eher B.  
 trifft eher n. z. / eher schlecht  
 trifft nicht zu / schlecht  
 trifft überhaupt nicht zu

**B2 Kollaboration in K1opt**

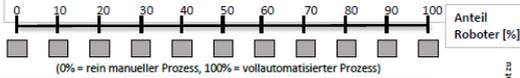
**B2.1** Bewerten Sie bitte den Arbeitsanteil des Roboters in K1opt auf folgender Skala zwischen 0% bis 100%!



<b>B2.2</b>	Sollte der Arbeitsanteil des Roboters in K1i verändert werden?	<input type="checkbox"/> stark erhöht	<input type="checkbox"/> erhöht	<input type="checkbox"/> keine Veränderung	<input type="checkbox"/> verringert	<input type="checkbox"/> stark verringert	trifft voll zu	trifft zu	trifft eher zu	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
<b>B2.3</b>	Die <i>Robotergeschwindigkeit</i> ermöglicht eine flüssige Kollaboration mit dem Roboter.											
<b>B2.4</b>	Haben Sie das Gefühl zu lange <i>Wartezeiten</i> im Prozess gehabt zu haben?											
<b>B2.5</b>	Ist der Roboter ein <i>zuverlässiger</i> Partner in K1opt?											
<b>B2.6</b>	In K1opt arbeiten der Roboter und ich <i>flüssig im Team</i> zusammen.											
<b>B2.7</b>	Die Zusammenarbeit mit dem Roboter wirkt sich <i>positiv auf das Gesamtergebnis</i> aus.											
<b>B2.8</b>	Der Einsatz von <i>Interaktionsmodulen</i> wirkt sich <i>positiv</i> auf die Zusammenarbeit aus.											
<b>B2.9</b>	Die <i>Interaktionsmodule</i> helfen mir dabei den Roboter zu <i>verstehen</i> .											
<b>B2.10</b>	Ich habe das Gefühl den/die <i>nächsten Schritt(e)</i> des Roboters zu <i>kennen</i> .											

**B3 Kollaboration in K3opt**

**B3.1** Bewerten Sie bitte den Arbeitsanteil des Roboters in K1opt auf folgender Skala zwischen 0% bis 100%!



<b>B3.2</b>	Sollte der Arbeitsanteil des Roboters in K1i verändert werden?	<input type="checkbox"/> stark erhöht	<input type="checkbox"/> erhöht	<input type="checkbox"/> keine Veränderung	<input type="checkbox"/> verringert	<input type="checkbox"/> stark verringert	trifft voll zu	trifft zu	trifft eher zu	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
<b>B3.3</b>	Die <i>Robotergeschwindigkeit</i> ermöglicht eine flüssige Kollaboration mit dem Roboter.											
<b>B3.4</b>	Haben Sie das Gefühl zu lange <i>Wartezeiten</i> im Prozess gehabt zu haben?											
<b>B3.5</b>	Ist der Roboter ein zuverlässiger Partner in K3opt? Ist der Roboter dann bereit, wenn Sie ihn benötigen?											
<b>B3.6</b>	In K3opt arbeiten der Roboter und ich flüssig im Team zusammen.											
<b>B3.7</b>	Die Zusammenarbeit mit dem Roboter wirkt sich <i>positiv auf das Gesamtergebnis</i> aus.											
<b>B3.8</b>	Der Einsatz von <i>Interaktionsmodulen</i> wirkt sich <i>positiv</i> auf die Zusammenarbeit aus.											
<b>B3.9</b>	Die <i>Interaktionsmodule</i> helfen mir dabei den Roboter zu <i>verstehen</i> .											
<b>B3.10</b>	Ich habe das Gefühl den/die <i>nächsten Schritt(e)</i> des Roboters zu <i>kennen</i> .											
<b>B3.11</b>	Das Zusammenwirken der beiden Roboter in K3opt ist flüssig.											
<b>B3.12</b>	Die <i>Geschwindigkeit des Roboters auf der Linearachse</i> empfinde ich als <i>unannehmlich</i> .											
<b>B3.13</b>	Die <i>Geschwindigkeit des Linearachs-Roboters</i> sollte <i>reduziert</i> werden.											

**C ERGONOMIE**

**C1 Ergonomie in K1opt**

C1.1	Veränderung der <i>körperlichen Beanspruchung</i> in K1opt im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Kraftaufwand	<input type="checkbox"/>
		Körperhaltung	<input type="checkbox"/>
C1.2	Veränderung der <i>psychischen Beanspruchung</i> durch die Arbeitsaufgabe in K1opt im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Zeitdruck	<input type="checkbox"/>
		Komplexität	<input type="checkbox"/>

nimmt stark zu  
nimmt zu  
nimmt eher zu  
nimmt eher ab  
nimmt ab  
nimmt stark ab

**C2 Ergonomie in K3opt**

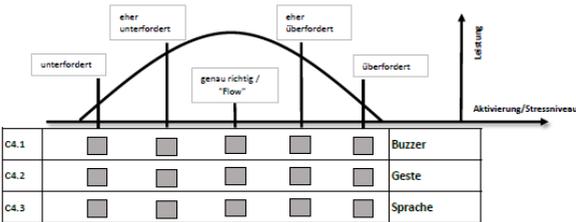
C2.1	Veränderung der <i>körperlichen Beanspruchung</i> in K3opt im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Kraftaufwand	<input type="checkbox"/>
		Körperhaltung	<input type="checkbox"/>
C2.2	Veränderung der <i>psychischen Beanspruchung</i> durch die Arbeitsaufgabe in K3opt im Vergleich zum manuellen Montageprozess ohne Roboter...	Zeitdruck	<input type="checkbox"/>
		Komplexität	<input type="checkbox"/>

**C3 Ergonomie der Steuerschnittstelle**

C3.1	Bitte bewerten Sie die Steuerschnittstelle hinsichtlich ihrer ergonomischen Bedienbarkeit.  (1= sehr gut; ... ; 6= schlecht)	Buzzer	<input type="checkbox"/>
		Geste	<input type="checkbox"/>
		Sprache	<input type="checkbox"/>

1 2 3 4 5 6

**C4** Wie bewerten Sie das Stresslevel während der Steuerung des Prozesses mit der jeweiligen Schnittstelle im Hinblick auf Ihre Leistung?



**D Bewertung**

Welche Steuerungsschnittstelle halten Sie für am besten geeignet? Gibt es Besonderheiten in Bezug auf eine Schnittstelle, die Sie hervorheben würden? Haben Sie das Gefühl, das eine Schnittstelle besser oder schlechter zu einem Konzept passt? Haben Sie weitere Anmerkungen, Feedback, Ideen?

## A.3 MTM Datenblätter

Prozessschritt: ATL holen und fixieren; 309,8 TMU						
Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
			18,6	TBC1		Drehung
			45,0	W3P		zu ATL
		R-E]		(R-E		
		R50B	18,4	R45B		zu ATL
		G1A	2,0	G1A		Greifen
		SC8/2	2,8	SC8/2		Stat. Kraftaufbau, (8kg 2 H.)
		M50B8/2	18,0	M45B8/2		Aus Vorrichtung
		G2)		(G2		
			18,6	TBC1		Drehung
			45,0	W3P		Zurück zu AP
		M35C8/2	16,8	M35C8/2		Einpassen
		ET	20,0			Blickverschiebung
		EF	7,3			Blickprüfung
		P1NSD	16,0	P1NSD		Fügen ATL in Vorrichtung
		RL1	2,0	RL1		Loslassen
		R-E	12,8	R30B		ZU Hebel
			2,0	G1A		Greifen
			10,2	M22A		Hebel umlegen
			2,0	RL1		Loslassen
		R26B	11,7			Zu Knopf
		G1A	2,0	(R-E		Greifen
		M6A	4,1	R2B		Knopf Ziehen
			2,0	G1A		Greifen
			20,1	M45C		Drehen
		RL1	10,4	P1NSE		Einfügen
			2,0	RL1		Loslassen

**Prozessschritt: QR-Code scannen (an ATL); 76,8 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
		R-E	21,2	R60B		Zum Scanner
			2,0	G1A		Greifen
		-	26,9	M65C		Zum Barcode
			3,1	M4A		Scanner betätigen (Finger)
			21,6	M65B		Scanner wegbringen
			2,0	RL1		Loslassen

**Prozessschritt: Ölrücklaufleitung holen; 206,9 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
		R-E	18,6	TBC1		Drehung
			60,0	(W4P		Zu ÖRL
		-		(R-E		
			15,6	R40B		ÖRL
			2,0	G1A		Greifen
			15,6	M40B		Aus Vorrichtung
		-		(G2		
			18,6	TBC1		Zurück zu AP
			60,0	W4P		
			14,5	M35B		Auf Tisch
			2,0	RL1		Ablegen

**Prozessschritt: Vormontage Ölrücklaufleitung; 172,2 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
Zur ÖRL		R45B	17	R35C		Zur Dichtung
Greifen		G1A	9,1	G4B		Greifen
		M-B	11,1	M18C		Zur Vorrichtung
			9,1	P1SSE		Fügen Dichtung
ÖRL bringen		M12C	9,1			
Fügen		P1NSE	10,4			
Loslassen		RL1	2			
Zu Schrauben		R12C	9,1			
Greifen		G4B	9,2	R-E)		
Zu 1. Schraubstelle		M14C	9,8			
Fügen		P2SD	21,8			
Loslassen		RL1	2			
			9,1	R12C		Zu zweiter Schraube
			9,1	G4B		Greifen
			10,5	M16C		Zu 2. Schraubstelle
			21,8	P2SD		Fügen
			2	RL1		Loslassen

**Prozessschritt: Montage Ölrücklaufleitung an ATL; 376,1 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
			19,2	R55B		Zur Kappe
			2,0	G1A		Greifen
		-	5,9	M8B		Abziehen
			17,4	M45A		Abwerfen
		R-A		(RL1		Während Bew. loslassen
		R10B	25,5	R75B		ZU ÖRL
		G1A	2,0	G1A		Aufnehmen
		B	29,0			Beugen
		M55B	19,2	M55B		Vor ATL bringen
			2,0	RL1		Lolassen
			21,2	R60B		Zu Schrauber
			2,0	G1A		Greifen
			25,2	M60C		Zu Schraube
			21,8	P2SD		In Schraube mit Schrauber
		M12C	9,8	M14C		An ATL
			11,2	P1NSD		Fügen Schraube Gewinde
			10,6	APA		Druck
			27,8	PT		Prozesszeit (1sek)
			9,8	M14C		Zu zweiter Schraube
			21,8	P2SD		In Schraube mit Schrauber
			10,6	APA		Druck
		RL1	27,8	PT		Prozesszeit (1sek)
		AB	31,9			Aufrichten
			20,4	M60B		Schrauber ablegen
			2,0	RL1		Loslassen

**Prozessschritt: ATL um 180 Grad drehen; 63,8 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
			21,2	R60B		
		R-B	2,0	G1A		
		G1A	2,0	(R-E		
		M6A	4,1	<del>R2B</del>		Knopf ziehen
			2,0	G1A		
			20,1	M45C		Drehen
		RL1	10,4	P1NSE		Einfügen
			2,0	RL1		Loslassen

**Prozessschritt: ATL um 180 Grad drehen und Dichtung prüfen; 137,82 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
			21,2	R60B		
		R-B	2,0	G1A		
		G1A	2,0	(R-E		
		M6A	4,1	<del>R2B</del>		Knopf ziehen
			2,0	G1A		
			20,1	M45C		Drehen
		RL1	10,4	P1NSE		Einfügen
			2,0	RL1		Loslassen
			66,7	PT		Bildaufnahme (2,4 sek)
				<del>ET</del>		Blickverschieben
			7,3	EF		Prüfen i.O.

**Prozessschritt: ATL entnehmen; 190,6 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
		R-B	11,1	R24B		ZU Hebel
			2,0	G1A		
			10,2	M22A		Hebel umlegen
			2,0	RL1		
		R-B	8,8	R16B		ATL aufnehmen
		G1A	2,0	G1A		Greifen
		SC8/2	2,8	SC8/2		Statischer Kraftaufbau
		M10B8/2	9,2	M16B8/2		
			18,6	TBC1		Drehung
			45,0	W3P		Laufen 2 m
		M10B8/2	13,3	M30B8/2		Ablegen
		RL1	2,0	RL1		Loslassen
			18,6	TBC1		Drehung
			45,0	W3P		Laufen zurück

**Prozessschritt: Robotersteuerung per Buzzer; 25,3 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
Zu Buzzer		R60A	14,7			
Buzzer drücken		APA	10,6			

**Prozessschritt: Robotersteuerung per Geste; 43,4 TMU**

Bezeichnung linke Hand	AxH	Kode	TMU	Kode	AxH	Bezeichnung Rechte Hand
			15,6	R65A		Zu Gestenerkennung
			27,8	PT		Geste darstellen (1 sek)

MTM-Kodierung des Referenzkonzepts sowie der drei interaktiven Konzepte am Beispiel Buzzer

	MTM-Kode		K0	Buzzer								
	l. Hand	r. Hand		K1			K2			K3		
				M	TMU	R	M	TMU	R	M	TMU	R
ATL holen		TBC1	0,0	0,0			25,3			25,3		
		W3P	18,6	18,6				18,6				18,6
	R-E	(R-E)	45,0	45,0				45,0				45,0
		R50B	0,0	0,0				0,0				0,0
		R45B	18,4	18,4			15,6	R40B		15,6	R40B	
		G1A	2,0	2,0			2,0	G1A		2,0	G1A	
		SC8/2	2,8	2,8			2,8	SC8/2		2,8	SC8/2	
		M50B8/2	18,0	18,0			15,6	M40B8/2		15,6	M40B8/2	
		G2)	(G2)	0,0	0,0				0,0			0,0
		TBC1	18,6	18,6				18,6				18,6
ATL fixieren		W3P	45,0	45,0				45,0				45,0
		M35C8/2	16,8	16,8			16,8			16,8		
		ET	20,0	20,0			20,0			20,0		
		EF	7,3	7,3			7,3			7,3		
		P1NSD	16,0	16,0			16,0			16,0		
		RL1	2,0	2,0			2,0			2,0		
		R30B	12,8	12,8			12,8			12,8		
		R-E	(R-E)	2,0	2,0			2,0		2,0		
		G1A	2,0	2,0			2,0			2,0		
		M22A	10,2	10,2	0,0		10,2			10,2		0,0
QR-Code scannen		RL1	2,0	2,0	0,0		2,0			2,0		0,0
		R26B	11,7	11,7	0,0		11,7			11,7		0,0
		G1A	(R-E)	2,0	2,0	0,0		2,0		2,0		0,0
		M6A	R2B	4,1	4,1	0,0		4,1		4,1		0,0
		G1A	2,0	2,0	0,0		2,0			2,0		0,0
		M45C	20,1	20,1	0,0		20,1			20,1		0,0
		RL1	P1NSE	10,4	10,4	0,0		10,4		10,4		0,0
		RL1	2,0	2,0	0,0		2,0			2,0		0,0
		R-E	R60B	21,2	21,2	21,2		21,2		21,2		21,2
		G1A	2,0	2,0	2,0		2,0		2,0		2,0	
ÖRL holen		M65C	26,9	26,9	26,9		26,9		26,9		26,9	
		M4A	3,1	3,1	3,1		3,1		3,1		3,1	
		M65B	21,6	21,6	21,6		21,6		21,6		21,6	
		RL1	2,0	2,0	2,0		2,0		2,0		2,0	
		R-E	TBC1	18,6	18,6	18,6		18,6		18,6		18,6
		(W4P	60,0	60,0	60,0		60,0		60,0		60,0	
		(R-E	0,0	0,0	0,0		0,0		0,0		0,0	
		R40B	15,6	15,6	15,6		15,6		15,6		15,6	
		G1A	2,0	2,0	2,0		2,0		2,0		2,0	
		M40B	15,6	15,6	15,6		15,6		15,6		15,6	
Vormontage ÖRL		(G2	0,0	0,0	0,0		0,0		0,0		0,0	
		TBC1	18,6	18,6	18,6		18,6		18,6		18,6	
		W4P	60,0	60,0	60,0		60,0		60,0		60,0	
		M35B	14,5	14,5	14,5		14,5		14,5		14,5	
		RL1	2,0	2,0	2,0		2,0		2,0		2,0	
		R45B	R35C	17,0	17,0	17,0	R8C	17,0	R8C	17,0	17,0	
		G1A	G4B	9,1	9,1	9,1		9,1		9,1		
		M-B	M18C	11,1	11,1	11,1		11,1		11,1		
		P1SSE	9,1	9,1	9,1		9,1		9,1		9,1	
		M12C	9,1	9,1	9,1		9,1		9,1		9,1	
	P1NSE	10,4	10,4	10,4		10,4		10,4		10,4		
	RL1	2,0	2,0	2,0		2,0		2,0		2,0		
	R12C	9,1	9,1	9,1		9,1		9,1		9,1		
	G4B	(R-E)	9,2	9,2	9,2		9,2		9,2			
	M14C	9,8	9,8	9,8		9,8		9,8		9,8		