

Universität Kassel

Fachbereich Maschinenbau

Arbeits- und Organisationspsychologie

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Methoden zur Auslegung einer Mensch-Roboter-Kooperation

Nadja Fischer

Betreuer: Prof. Dr. phil. habil. Oliver Sträter

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Dezember 2019

doi:10.17170/kobra-20191217880

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
Zusammenfassung.....	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	3
1.1.1 Allgemein – Die schnelle Entwicklung der Mensch-Roboter-Schnittstelle ...	3
1.1.2 Speziell – Physische Kontakte zwischen Mensch und Roboter	3
1.1.3 Gesellschaftspolitische Einordnung	5
1.2 Forschungsfragen	8
2 Überblick der Mensch-Roboter-Kooperation	10
2.1 Begriffe und Definitionen.....	10
2.2 Stand der Technik.....	13
2.2.1 Stand der industrietauglichen Technik.....	15
2.2.2 Robotermodelle und Robotermarkt.....	16
2.3 Beschreibung der Charakteristiken einer Mensch-Roboter-Kooperation.....	18
2.3.1 Charakteristiken des Roboters.....	19
2.3.2 Charakteristiken des Menschen.....	25
2.3.3 Charakteristiken der Arbeitsumgebung von Mensch und Roboter	47
2.3.4 Charakteristiken der Arbeitsplatzgestaltung	58
2.3.5 Zusammenfassung der Charakteristiken	62
3 Methoden	64
3.1 Eye-Tracking – Blickbewegungsanalyse	65
3.1.1 Das menschliche Auge.....	68
3.2 Evaluierung mittels Fragebogen	79

3.3	Zusammenfassung	82
4	Versuchsdurchführungen	84
4.1	Vorbereitende Versuche	84
4.1.1	Voruntersuchung 1 – Entfernung und Winkel in der MRK	87
4.1.2	Voruntersuchung 2 – Entfernungsvariation in der Z-Ebene.....	96
4.1.3	Voruntersuchung 3 – Reduzierte Entfernungsvariation in der Z-Ebene ...	101
4.1.4	Voruntersuchung 4 – Farbwirkung des Robotergreifers	110
4.1.5	Voruntersuchung 5 – Autonome Robotik	115
4.1.6	Zusammenfassung der Vorversuche	124
4.2	Versuchsplanung und -grundlagen.....	125
4.2.1	Auswahl des Arbeitsplatzes und der Probanden	126
4.2.2	Versuchsdesign.....	127
4.2.3	Allgemeine Vorbereitung	129
4.2.4	Gestaltung des Fragebogens.....	130
4.3	Hauptversuch	136
4.3.1	Hypothesen	136
4.3.2	Versuchsdurchführung	137
4.3.3	Beobachtungen	139
4.3.4	Auswertung	142
4.3.5	Diskussion und Einordnung der Ergebnisse	171
4.3.6	Intelligente Robotik.....	173
4.3.7	Zusammenfassung des Hauptversuchs.....	178
5	Gesamtergebnisse	179
6	Fazit und Ausblick	182
6.1	Fazit	182
6.2	Ausblick.....	184
	Literaturverzeichnis	187

Anhang211

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Status neuer Robotersysteme nach dem Hype Cycle.....	1
Abbildung 2: Beschäftigte und Roboter in der Automobilindustrie in Deutschland	7
Abbildung 3: KUKA KMR iiwa in der Getriebefertigung	13
Abbildung 4: Zweiarm-Roboter der Fa. Epson.....	17
Abbildung 5: Polierroboter mit 130 kg Traglast von Fa. Comau.....	17
Abbildung 6: Charakteristiken der Mensch-Roboter-Kooperation	18
Abbildung 7: Bestandteile eines Roboterarbeitsplatzes	19
Abbildung 8: Charakteristiken eines Roboters.....	21
Abbildung 9: Charakteristiken des Menschen.....	26
Abbildung 10: Autonome Plattform in der Komponentenfertigung	28
Abbildung 11: Verarbeitungszyklus.....	34
Abbildung 12: Idealisierter Regelkreis der direkten MRK	37
Abbildung 13: Europäische Zustimmung zur Robotik.....	39
Abbildung 14: Komfortgefühl der EU-Bürger bei Roboterunterstützung.....	40
Abbildung 15: Die Meinung der EU-Bürger über Roboter	45
Abbildung 16: Charakteristiken des Arbeitsraums	48
Abbildung 17: Kombination aus zeitlicher und örtlicher Trennung	49
Abbildung 18: MRK tauglicher Greifer für Getrieberäder.....	54
Abbildung 19: Greifer mit Bildschirm als Informationsschnittstelle	55
Abbildung 20: Klassifikation des MRK-Levels.....	59
Abbildung 21: Horizontalabschnitt durch das menschliche Auge.....	68
Abbildung 22: Okulomotorik	69
Abbildung 23: Zusammenhang von Augen- und Kopfdrehung.....	70
Abbildung 24: Sehschärfe und Zapfen- und Stäbchendichte in der Netzhaut.....	72
Abbildung 25: Gesichtsfeldkarte	73

Abbildung 26: Blick- und beidseitiges Gesichtsfeld	74
Abbildung 27: Koordination einer sakkadischen Augen-Kopfbewegung	74
Abbildung 28: Ablauf der Augenbewegung und Handlung	78
Abbildung 29: Vorversuch 1 – Schematischer Aufbau des Versuchs	89
Abbildung 30: Vorversuch 1 – Aufbau der Handlingsapplikation.....	90
Abbildung 31: Vorversuch 1 – Ablaufskizze.....	92
Abbildung 32: Vorversuch 1 – Proband während des Vorversuchs in Position 3c.....	93
Abbildung 33: Vorversuch 1 – Zuordnung der Fixationen auf die AOIs	94
Abbildung 34: Vorversuch 1 – Anzahl Sakkaden pro Minute von Proband 1 und 2.....	95
Abbildung 35: Vorversuch 2 – Skizzierter Aufbau	97
Abbildung 36: Blickfeld d. Probanden – Roboters in der untersten Bewegungsebene..	99
Abbildung 37: Blickfeld d. Probanden – Roboter in der obersten Bewegungsebene....	99
Abbildung 38: Vorversuch 2 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Kniebereich	100
Abbildung 39: Vorversuch 2 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Hüftbereich	101
Abbildung 40: Vorversuch 2 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Schulterbereich	101
Abbildung 41: Vorversuch 3 – Versuchsskizze.....	102
Abbildung 42: Vorversuch 3 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Kniebereich	103
Abbildung 43: Vorversuch 3 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Hüftbereich	104
Abbildung 44: Vorversuch 3 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Schulterbereich	104
Abbildung 45: Vorversuch 2 + 3 – Versuchsdesign im Vergleich	105
Abbildung 46: Vorversuch 2 + 3 – Fixationen auf den Roboter	105
Abbildung 47: Vorversuch 2 + 3 – Häufigkeit der Sakkaden auf den Roboter	106
Abbildung 48: Vorversuch 2 – Zusammenfassung der Blickanteile nach AOIs	107
Abbildung 49: Vorversuch 3 – Zusammenfassung der Blickanteile nach AOIs	107
Abbildung 50: Vorversuch 2 + 3 – Direkter Abstand zum Kopf des Probanden.....	108
Abbildung 51: Vorversuch 2 + 3 – Durchschnittlicher Pupillendurchmesser	109
Abbildung 52: Vorversuch 4 – Versuchsskizze und Darstellung der Roboterbahnen..	112

Abbildung 53: Blickfeld d. Probanden – Roboter außerhalb des Blickfeldes	112
Abbildung 54: Blickfeld d. Probanden – Blauer Greifer im Blickfeld	113
Abbildung 55: Vorversuch 4 – Auswertung der AOIs außerhalb des Lesebereichs.....	114
Abbildung 56: Vorversuch 4b – Auswertung nach Farbe des Greifers.....	115
Abbildung 57: Autonom navigierender Reinigungsroboter der Fa. Cleanfix	116
Abbildung 58: Blickfeld d. Probanden – Ausgangssituation (1).....	118
Abbildung 59: Blickfeld d. Probanden – Nach der ersten Stunde des Einsatzes (2a) .	118
Abbildung 60: Blickfeld d. Probanden – Nach 3 Stunden im Einsatz (2b).....	119
Abbildung 61: Vorversuch 5 – Verteilung der Fixationen (Roboter im Blickfeld).....	120
Abbildung 62: Vorversuch 5-2a – Fixationsdauer	120
Abbildung 63: Vorversuch 5-2b – Fixationsdauer	121
Abbildung 64: Blickfeld d. Probanden – Nach dem Auftauchen des Roboters	123
Abbildung 65: Blickfeld d. Probanden – Letzte bekannte Roboterposition.....	123
Abbildung 66: Aufbau des Trainingskonzeptes mit MRK Roboter.....	128
Abbildung 67: Schematischer Aufbau der Hauptuntersuchung	129
Abbildung 68: Abkürzungen und Erläuterungen der Roboterbewegung	139
Abbildung 69: Blickfeld d. Probanden – Nahestehender Part des Roboters	140
Abbildung 70: Blickfeld d. Probanden – Greiferöffnen.....	140
Abbildung 71: Blickfeld d. Probanden – Bewegungen im Hintergrund	141
Abbildung 72: Blickfeld d. Probanden – Fixationen auf helle Reflektionen	141
Abbildung 73: Verteilung der Fixationen auf RAM, RAP und RF	143
Abbildung 74: Referenzzustand, Prozessüberwachung (RF).....	146
Abbildung 75: Referenzzustand, Prozessüberwachung der Anlage (RF)	147
Abbildung 76: Bewegung quer zum Probanden (RAM).....	148
Abbildung 77: Bewegung quer zum Probanden (RAM).....	149
Abbildung 78: Bewegung frontal auf den Probanden zu (RAP)	150
Abbildung 79: Bewegung frontal auf den Probanden zu (RAP)	151

Abbildung 80: Wartezeit auf Interaktion durch Proband (RAW)	152
Abbildung 81: Wartezeit auf Interaktion durch Proband (RAW)	152
Abbildung 82: Interaktion (RI) – Verteilung der Fixationen nach AOIs	153
Abbildung 83: Interaktion (RI)	154
Abbildung 84: Wartezeit zur Einleitung Rückwärtsbewegung (RAB)	154
Abbildung 85: Wartezeit zur Einleitung Rückwärtsbewegung (RAB)	155
Abbildung 86: Bewegung rückwärts, vom Probanden weg (RABB)	156
Abbildung 87: Bewegung rückwärts, vom Probanden weg (RABB)	156
Abbildung 88: Vergleich der Mittelwerte des Roboterstatus	157
Abbildung 89: Differenzwertpaare des Bewegungsstatus	158
Abbildung 90: Verteilung der Fixationen mit Hintergrundbewegungen	161
Abbildung 91: Verteilung der Fixationen ohne Hintergrundbewegungen	162
Abbildung 92: Pupillendurchmesser über die Versuchsabschnitte hinweg	165
Abbildung 93: Auswertung des Fragebogens – Teil 1b	168
Abbildung 94: Auswertung des Fragebogens – Teil 2a (NASA TLX)	169
Abbildung 95: Auswertung des Fragebogens – Teil 2b	171
Abbildung 96: Langsame Helligkeitskorrektur des Systems	172
Abbildung 97: links: Arbeitsplatzkonzept für eine intelligente MRK	174
Abbildung 98: Schematische Darstellung des Konzeptes Abstandsüberwachung	175
Abbildung 99: Schematische Darstellung des Konzeptes in einem Zeitintervall	177

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung
AOI	Area of Interest
AI	Artificial intelligence
BDI	Bundesverbands der Deutschen Industrie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CGL	Corpus geniculatum laterale
CIM	Computer-integrated manufacturing
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DEA	dielektrische Elastomeraktoren
EK	Europäische Kommission
FOV	Field of View
IDC	International Data Corporation
IFR	International Federation of Robotics
iiwa	Intelligent industrial work assistants
IR	Infrarotes Licht
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LBR	Leichtbauroboter
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
NARS	Negative attitude toward robots scale
NASA TLX	NASA Task Load Index
RAS	Robot Anxiety Scale
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UR	Universal Robots
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

Zusammenfassung

Bereits Karl Marx (1818 - 1883) warnte zu seiner Zeit, denn „In Manufaktur und Handwerk bedient sich der Arbeiter der Werkzeuge, in der Fabrik dient er der Maschine“ (Marx zit. in Pot, 1985, S. 909).

Heute befinden wir uns inmitten eines Industriebypes, der dem Arbeiter im marxschen Sinn einen Roboter als Maschine gegenüberstellt. In der Interaktion von Mensch und Roboter entfallen Schutzzäune und werden durch integrierte Sensorik ersetzt. Wie wirkt sich dies jedoch auf den Arbeiter aus?

Genau diese Frage wird innerhalb des vorliegenden Dissertationsverfahren untersucht. Hierzu wird die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter umfassend anhand ihrer Charakteristiken vorgestellt. Diese werden daraufhin in praktischen Untersuchungen geprüft. Durch objektive und subjektive Messverfahren wird gezeigt, dass sich der Abstand, der Winkel und die Geschwindigkeit eines Roboters signifikant auf einen Menschen auswirken. Ein besonderes Interesse stellen in dieser Arbeit die verschiedenen Bewegungsmuster des Roboters dar. Hierzu werden sieben verschiedene Bewegungsformen betrachtet und deren unterschiedliche Wirkweisen nachgewiesen. Besonders auffällig zeigen sich die frontale Roboterbewegung sowie die Zeit kurz vor der tatsächlichen Interaktion zwischen Mensch und Roboter, die sich durch eine signifikante Aufmerksamkeitsfokussierung auszeichnen.

Diese Auswirkungen werden in Form von Blickbewegungsmustern durch ein Eye-Tracking System erhoben. Dadurch sind Rückschlüsse auf die Aufmerksamkeitsverteilung, die Beanspruchung und das Erschrecken der Probanden möglich.

Entsprechend dieser Bewertung wird eine Auslegungsempfehlung für die Gestaltung einer Mensch-Roboter-Interaktion erstellt, sodass Menschen im 21. Jahrhundert nicht wie zu Karl Marx' Zeiten dem Roboter dienen müssen, sondern sich der Roboter entsprechend der tolerierbaren Beanspruchung dem Menschen unterordnet.

1 Einleitung

Der Beginn des 21. Jahrhunderts wird assoziiert mit ungekannter Schnellebigkeit und dynamischen Veränderungen (Gedinat, 2016, S. 222). Immer neue Herausforderungen und veränderliche Bedingungen betreffen sowohl den Privatmann wie auch das industrielle Produktionsumfeld. In rasantem Tempo treffen neue Produkte auf neue Abnehmer und die Nutzungsdauer eines Produktes reduziert sich (Deutscher Bundestag, 2016, S. 11). In immer kürzeren Abständen fordert der Markt Neuheiten und individuelle Leistungen (Kast, 2014, S. 230). Um in diesem Wettbewerb zu bestehen, findet in der Industrie ein Umdenken statt, bekannte Produktlebenszyklen und Entwicklungsverfahren können dem Wunsch nach Neuheiten nicht standhalten und müssen gegen innovative und flexible Verfahren eingetauscht werden (Berthel, 2012, S. 104).

Einen „grundlegenden Paradigmenwechsel“ (Haddadin et al., 2010, S. 696) um flexible Produktionsstrukturen zu schaffen, stellen dabei neue Robotersysteme dar. Diese sollen zukünftig smart, vernetzt und autonom mit dem Menschen zusammenarbeiten. Gartner erwartet den produktiven Einsatz dieser Technologien in fünf bis zehn Jahren. Aktuell befinden sie sich kurz vor dem Hochpunkt der überzogenen Erwartungen (Gartner, 2018), siehe Abbildung 1.

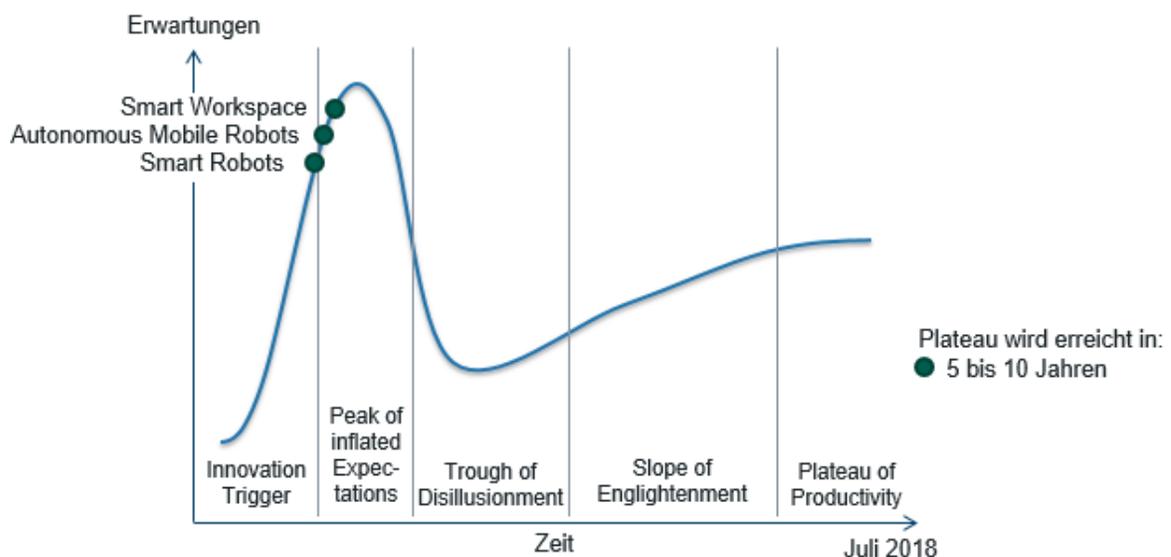


Abbildung 1: Status neuer Robotersysteme nach dem Hype Cycle (vgl. Gartner, 2018)

Hierfür sollen intelligente Roboter eine wandlungsfähige Produktion ermöglichen, die unabhängig von Kapazitätsschwankungen und Produktspezifikationen die bisherige Lücke (Westkämper et al., 2000, S. 26) zwischen der manuellen und der automatisierten Produktionen schließt (Butov et al., 2014, S. 89). Diese Automatisierungslücke wurde bisher aus überwiegend wirtschaftlichen Gründen in Kauf genommen (Dietz, 2012, S. 24). Für die neuartige Verknüpfung von Mensch und Roboter bietet dieser Übergangsbereich, der bisher für die rein manuelle Produktion eine zu hohe und die vollautomatische Produktion eine zu niedrige Stückzahl aufwies, ein vollkommen neues Anwendungsgebiet (Rohwedder, 2005, S. 40). Die Schließung dieser Kluft ist zwingend erforderlich, um die künftigen Marktanforderungen wirtschaftlich bedienen zu können (BMBF, 2015, S. 4).

Ein höherer Automatisierungsgrad, insbesondere an Arbeitsplätzen, an denen Mitarbeiter bisher aus Gründen der Komplexität nicht durch technische Möglichkeiten unterstützt werden konnten (Weidner, 2015; Deutscher Bundestag, 2002, S. 26), begegnet darüber hinaus dem demografischen Wandel (Frühbuss, 2018, S. 4; Statistisches Bundesamt, 2011, S. 24; Statistisches Bundesamt, 2018).

Die Bundesrepublik Deutschland wird im Jahr 2025 mit einem Anteil der erwerbsinaktiven Bevölkerung von etwa 50% der gesamten Erwerbsbevölkerung (Statistisches Bundesamt, 2019, S. 1) sowie den teilweise bereits anzutreffenden Fachkräftemangel konfrontiert werden (VDMA, 2014, S. 21; Schmitz, 2019, S. 20). Damit diese reduzierte Arbeitskraft ausgeglichen und die Produktivität mindestens auf dem aktuellen Niveau gehalten werden kann, sollen Roboter als Garanten für Beschäftigung und als Sicherung des Produktionsstandorts Deutschland eingesetzt werden (Rumsch et al., 2014, S. 26). Durch den Einsatz neuer Roboter in Fertigungsprozessen kann eine Produktivitätssteigerung von ca. 20 % verfolgt werden (McKinsey, 2017b, S. 27; Bundesrat, 2010, S. 4). Wichtige Grundlage hierfür ist jedoch das Zusammenspiel der technischen und sozialen Innovationsprozesse (Kagermann et al., 2013, S. 18).

Die neuen Robotersysteme sollen den Menschen dabei insbesondere bei monotonen und nicht ergonomischen Tätigkeiten unterstützen (Hirsch-Kreinsen & Weyer, 2014, S. 19; Krieger et al., 2008, S. 2, 6). Dem Menschen obliegt die Führung und Verantwortung in den Prozessen, wodurch die industrielle Arbeit eine inhaltliche Aufwertung erfährt (Graetz & Michaels, 2015, S. 5).

1.1 Motivation

1.1.1 Allgemein – Die schnelle Entwicklung der Mensch-Roboter-Schnittstelle

Die neuen Robotersysteme unterliegen aktuell einem Hype (Gartner, 2018), der auf den vielfältigen Möglichkeiten beruht, die sie bieten. Hierfür kann beispielsweise die Kombination von Automatisierung und künstlicher Intelligenz zu einem smarten System genannt werden.

Entsprechend des Innovationsgrades und der rasanten Entwicklung des Feldes der smarten Robotersysteme sind allerdings viele Aspekte und Anforderungen heute noch ungeklärt (Kuhlenkötter, 2018, S. 48; Schmitz, 2019, S. 20). Zum aktuellen Zeitpunkt kann noch nicht abgeschätzt werden, wann und in welcher Form sich diese Roboter in der Industrie durchsetzen und welchen Anteil am Gesamtmarkt der Roboter sie einnehmen werden (Large, 2017).

Die neuartige Zusammenarbeit von Mensch und Roboter, die Mensch-Roboter-Kooperation, die durch den Wegfall von Schutzzäunen ermöglicht wird, birgt jedoch nicht nur Vorteile (Weber, 2017, S. 2; Schmitz, 2019, S. 20). Neue Belastungsfaktoren können Unsicherheit bezüglich der neuen Technik, Arbeitsverdichtung, Beschleunigung der Prozesse, weniger Bewegung und digitaler Stress sein (Schmitz, 2019, S. 20). Neue Normen und Regelungen werden geschaffen, um die innovative Zusammenarbeit in technische und rechtliche Grenzen zu bringen, beispielsweise die ISO/TS 15066. Neben den elementaren Aspekten der Sicherheit für den Menschen (De Santis et al., 2007, S. 256), der direkt mit dem Roboter zusammen arbeiten soll, entstehen Diskussionen um mögliche Beanspruchungen durch die Robotik (BetrSichV § 3 Gefährdungsbeurteilung, 2015, Abs. 1, 2), ethische Klärungsansprüche nach tolerierbaren Berührungen und die Frage, wie ein schutzzaunbefreiter Roboter in optimaler Weise mit einem Menschen interagieren sollte (Schmitz, 2019, S. 21).

1.1.2 Speziell – Physische Kontakte zwischen Mensch und Roboter

Unter einer Mensch-Roboter-Zusammenarbeit wird im Allgemeinen die Kategorie der Leistungs- und Kraftbegrenzung nach DIN EN ISO 10218-2 (2012) verstanden. Die erlaubten Grenzwerte des Kontakts von Mensch und Roboter sind in der ISO/TS

15066 (2016) festgelegt und beruhen auf praktischen Versuchen zum Schmerzeintritt, insbesondere durch die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV, 2017, S. 5).

Der aktuelle Stand der Technik sieht den Kontakt zwischen Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum unter diesen Bedingungen vor. Die möglichen Kontakte lassen sich in gewollte und ungewollte Kontakte unterteilen (Müller et al., 2017, S. 19).

Unter einem gewollten Kontakt lässt sich die Übergabe oder das Halten eines Bauteils (DIN EN ISO 10218-2, 2012, S. 15) zur ergonomischen Weiterbearbeitung durch den Menschen verstehen.

Zu den ungewollten Kontakten zählen Kontakte, die nicht der Aufgabenerfüllung dienen, d. h. für die Zielerreichung nicht notwendig sind. Beispielhaft sei eine Kollision auf einer Bewegungsbahn des Roboters genannt, die grundlegend unabhängig vom Menschen abläuft.

Im Fall von Arbeitsplätzen, die durch eine Zusammenarbeit auf engstem Raum gekennzeichnet sind und bei denen ungewollte Kontakte im starrem Ablaufprogramm regelmäßig im Ablaufzyklus auftreten können, sollte die Belastungsgrenze durch ungewollte Kontakte auf ein „ergonomisch vertretbares Niveau verringert werden“ (ISO/TS 15066, 2017, S. 26).

In einem solchen Fall ist es nötig, den Roboter zu befähigen, mit dem Menschen in Kontakt zu treten, zu kommunizieren und intelligent zu reagieren. Diese Anforderungen stellen die Forschung vor eine große Herausforderung. Bereits in dem Forschungsstadium solcher Systeme wird die Schnittstellen- und Sicherheitsbetrachtung eines frei beweglichen und selbstentscheidenden Systems diskutiert (Veigt et al., 2013, S. 16; Lass & Kotarski, 2014, S. 405).

Viele bereits publizierte Einsätze von kooperierenden Robotern zeigen Arbeitsplätze, bei denen der ungewollte Kontakt durch arbeitsorganisatorische Maßnahmen so gering gehalten wird, dass er tolerierbar ist (Bauer et al., 2016, S. 41 ff.). Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass sich Kooperationsarbeitsplätze, die durch ungewollte Kontakte gekennzeichnet sind, dauerhaft nicht durchsetzen werden. Der Vermeidung solcher Kontakte durch intelligente Roboter wird in der Forschung bereits ein hoher Stellenwert zugeordnet (Fernández et al., 2016).

1.1.3 Gesellschaftspolitische Einordnung

Anfang des Jahres 2015 ließ die Bank ING-DiBa eine Studie erstellen, die durch ihre provokanten Aussagen viel Kritik hervorrief. Als Basis diente die Studie „*The future of employment: how susceptible are jobs to computerization?*“ aus Oxford (Frey & Osborne, 2013), welche die ING-DiBa auf Deutschland übertragen ließ.

Die Autoren Carsten Brzeski und Inga Burk des Economic Research sehen in dem zunehmenden Anstieg von Robotern einen drohenden Arbeitsplatzverlust für 18,3 Mio. Menschen, ca. 59% der Beschäftigten, deren Beschäftigungsverhältnis in die Klassifikation der Berufe der Bundesagentur für Arbeit (KldB 2010) eingeordnet werden kann. Insbesondere sei eine Gefahr in den Servicebereichen, wie der Paketzustellung durch Drohnen, zu sehen (Brzeski & Burk, 2015, S. 1).

Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und die International Federation of Robotics (IFR) widersprechen diesen Aussagen, da insbesondere die Erhaltung der Wettbewerbsvorteile von klassisch produzierenden Konzernen in Hochlohnländern wie Deutschland durch die Automatisierung nicht berücksichtigt seien (Schwarzkopf, 2015, S. 3; International Federation of Robotics, 2016b, S. 1). Weiterhin seien die herangezogenen subjektiven Annahmen bzgl. des realen technologischen Fortschritts nicht belegbar (Schwarzkopf, 2015, S. 5, 6). Die wertvolle Chance für neue Berufe und Beschäftigungsfelder in der Automatisierung und Digitalisierung werde in dieser Studie ebenfalls nicht erwähnt (Meyer, 2015, S. 46).

Dengler und Matthes (2015, S. 9) kritisieren die Studie der ING-DiBa darüber hinaus für die direkte Übertragung der Substitutionsgefahr in Amerika auf die deutsche Wirtschaft. Dengler und Matthes gehen von unterschiedlichen Tätigkeitsprofilen in den Berufsgruppen zwischen der amerikanischen und europäischen Wirtschaft aus, die in der Studie der ING-DiBa aufgrund von Nichtberücksichtigung zu Zuordnungsproblemen geführt habe (Dengler & Matthes, 2015, S. 10). Weiterhin liegen Differenzen in den verschiedenen Bildungssystemen vor (Dengler & Matthes, 2015, S. 7). Dengler und Matthes konzentrierten ihre Untersuchungen auf Routinetätigkeiten, die im Jahr 2013 von einem computergestützten System ausgeführt werden konnten (Dengler & Matthes, 2015, S. 11).

Diese Substituierbarkeitspotentiale werden für die unterschiedlichen Anforderungsniveaus der Berufssegmente als Wahrscheinlichkeit berechnet (Dengler & Matthes, 2015, S. 12). Insgesamt ergeben sich Automationsrisiken für Helferberufe und

Fachkraftberufe von je 45%, für Spezialisten von 32% und für Experten von 19%. In direktem Zusammenhang mit dem Bildungsgrad stehe die Häufigkeit der im Job ausgeführten Routinetätigkeiten. Insbesondere diese können durch Maschinen ausgeführt werden (Dengler & Matthes, 2015, S. 13).

Dies bedeute jedoch nicht, dass die Entwicklung einer technischen Umsetzung wirtschaftlich oder gesellschaftlich gewollt ist (z.B. Pflegeroboter im Altenheim; Schwentker, 2016a, S. 3). Die angegebenen Prozentwerte stellen daher lediglich "Substituierbarkeitspotenziale" dar (Schwentker, 2016b, S. 1).

Die Studie *Robots at Work* der Universität Uppsala und der London School of Economics greift auf, dass die Befürchtungen, technologische Innovationen würden Arbeitsplätze vernichten, durchaus nicht neu seien (Graetz & Michaels, 2015, S. 3). Ein Einfluss sei dabei nur auf gering und in geringerem Maße auf mittel qualifizierte Arbeitskräfte erkennbar (Graetz & Michaels, 2015, S. 4). Demnach sei kein Rückgang der Beschäftigung, jedoch ein Anstieg der Löhne angesichts der Aufwertung der menschlichen Arbeit durch den technischen Fortschritt zu erwarten (Graetz & Michaels, 2015, S. 5).

Dies bedeute andererseits eine Abnahme von geringqualifizierten Repetitivarbeiten (Hirsch-Kreinsen & Weyer, 2014, S. 19), beispielsweise einfachen Handlungsaufgaben, wie dem manuellen Handling von mechanischen Bauteilen in einer Komponentenfertigung. Ein revolutionäres Beispiel ist die veränderte Arbeit von Bauern, die vor der Erfindung des Pfluges, ihre Felder von Hand bearbeiteten.

Der Anteil der Arbeitsplätze mit solchen Repetitivarbeiten, die sich mit aktuell einsetzbaren Technologien vollständig automatisieren lassen, liege bei unter 5% (McKinsey, 2017a, S. 33). Eine Arbeitsstudie des Jobportals StepStone bestätigt dies durch eine Befragung von Fachkräften, von denen nur 15% die Digitalisierung als Bedrohung (Hermann & Pela, 2018, S. 17), 68% sie hingegen als positive Entwicklung ansehen (Hermann & Pela, 2018, S. 18).

Die Studie *Deutschland 2030 – Zukunftsperspektiven der Wertschöpfung* des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI) zeigt das Risiko mangelnder Technologieakzeptanz auf. Eine Fokussierung auf die Risiken von Innovationen und die bürokratischen Widerständen führe zu einer Nichtrealisierung der Innovationen in Europa. Unternehmen suchten sich daraufhin innovationsfreudigere Umsetzungsstandorte, beispielsweise in Asien (BDI, 2011, S. 66). Dies habe große

Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit und das Wachstum der europäischen Wirtschaft (Mann, 2016, S. 8) und somit auch auf die Beschäftigung in Deutschland. Die Studie "Economic Impact of AI on CRM" der International Data Corporation (IDC) ermittelt einen Zuwachs von 134 tausend Jobs in Deutschland durch die Nutzung von Artificial intelligence (AI; IDC, 2017, S. 18). Zuerst betreffe diese Entwicklung die produzierende Industrie (BDI, 2011, S. 67).

Der BDI stellt die Innovationskraft eines Landes in den direkten Zusammenhang mit der gesellschaftlichen Akzeptanz, die langfristig erarbeitet und aufgebaut werden muss (BDI, 2011, S. 95). Die Innovationsführerschaft – insbesondere durch die Entwicklung und Anwendung innovativer Montageanlagen – solle durch Flexibilität bei Varianten- und Stückzahlenschwankungen zur Produktivitätssteigerung und Ressourceneffizienz und damit zur Sicherung des Produktions- und Logistikstandorts Deutschland beitragen (BMBF, 2015, S. 2 & Veigt et al., 2013, S. 15). Durch die Nutzung von Höchstautomatisierung (Rüdiger, 2017, S. 20), intelligenten Robotern und Computern wird ein Wachstum des Bruttoinlandprodukts bis 2030 von 4% erwartet (McKinsey, 2017b, S. 15).

Erwerbstätigenentwicklung in der Automobilindustrie

In der deutschen Automobilindustrie erhöhte sich die Zahl der Beschäftigten in den Jahren 2010 bis 2015 leicht. Sowohl die Zahl der Beschäftigten stieg um durchschnittlich +2,5% pro Jahr (IFR, 2016b, S. 3) als auch der installierte Roboterbestand von 2011 bis 2016 um durchschnittlich +2% (World Robotics Report, 2017, S. 394; Abbildung 2).

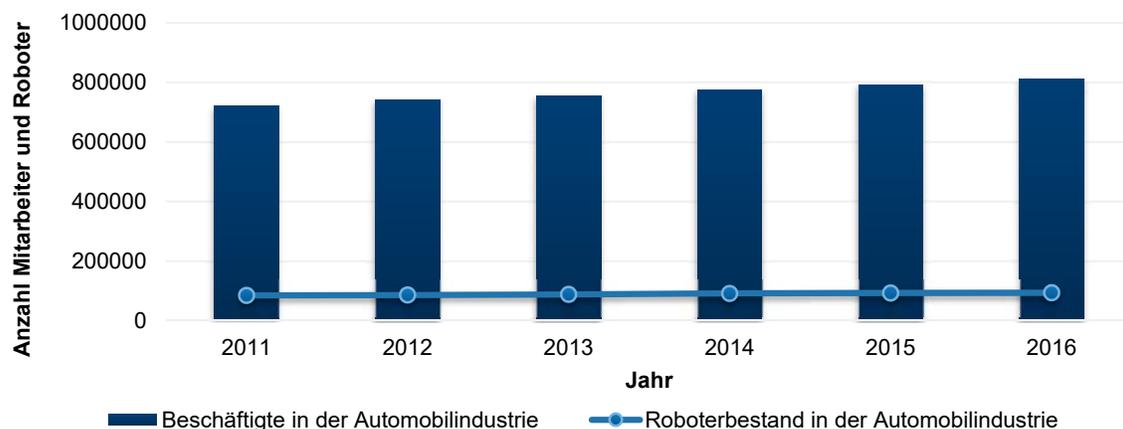


Abbildung 2: Beschäftigte und Roboter in der Automobilindustrie in Deutschland
(Statistisches Bundesamt, 2016a; Statistisches Bundesamt, 2016b; World Robotics Report, 2017, S. 394; IFR, 2015; IFR, 2016a, S. 1; VDA, 2019)

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl von Beschäftigten und dem Einsatz von Industrierobotern konnte bisher nicht nachgewiesen werden (Lenz, 2018, S. 8).

1.2 Forschungsfragen

In den wissenschaftlichen Fragestellungen der vorliegenden Dissertation werden die elementaren Aspekte der Auslegung eines gemeinsamen Arbeitsplatzes von Mensch und Roboter beschrieben.

Dabei soll die vorliegende Dissertation neue Erkenntnisse im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) liefern. Dies soll anhand einer Prüfung des Technologie-Leitbildes der MRK auf der operativen Ebene erfolgen.

Die grundlegende Fragestellung (1) dieser Arbeit beruht auf der Annahme einer durch Kenngrößen beschriebenen Interaktion zwischen Mensch und Roboter, welche sowohl definiert als auch analysiert wird.

- 1) Wodurch wird die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter beschrieben?

Die ermittelten Charakteristiken und die praktischen Erfahrungen mit kooperativen Arbeitsplätzen (vgl. Bauer et al., 2016, S. 41 ff.) sollen der Auslegung einer sinnvollen und zielgerichteten Interaktion von Mensch und Roboter dienen (Fragestellung 2). Durch praktische Untersuchungen mittels Methoden des Eye-Trackings sollen die Charakteristiken an industrienahen Arbeitsplätzen angewandt und bestätigt werden. Mittels dieser Methoden wird der physische Zustand, den der Roboter bei einem Menschen auslöst, sowie die Aufmerksamkeit während der Zusammenarbeit mit dem System, untersucht (vgl. Haddadin et al., 2010, S. 697). Das Ergebnis soll eine Empfehlung für die aktuell umsetzbare Zusammenarbeit von Mensch und Roboter im industriellen Kontext sein und Möglichkeiten zur Vermeidung „ungewollter“ Kontakte zwischen Mensch und Roboter aufzeigen.

- 2) Wie sollte ein Arbeitsplatz gestaltet sein, der durch möglichen, „ungewollten“ Kontakt zwischen Mensch und Roboter gekennzeichnet ist?

Fragestellung 3 dieser Arbeit soll auf Basis der praktischen Untersuchungen eine Empfehlung für intelligente und berührungslose Systeme aufzeigen (vgl. Höcherl et al., 2015, S. 39). Dieser Ausblick soll eine Vision darstellen, in welcher Art ein intelligentes System aufgebaut sein kann und welche Auswirkung dies auf einen interagierenden Menschen hat.

- 3) Wie ändert sich diese Auslegungsempfehlung unter dem Aspekt der intelligenten Robotik?

Die Ergebnisse sollen zur Gestaltung von zukunftssichernden Arbeitsplätzen im Rahmen des demografischen Wandels dienen. Insbesondere den Konstrukteuren und Fertigungsplanern, die Produktionsarbeitsplätze beschreiben, soll diese Arbeit eine Auslegungsempfehlung (vgl. Kuhlenkötter, 2018, S. 48) für zukünftige Arbeitsplätze bieten (Fragestellung 4).

Trotz einer extrem praxisnahen Betrachtung von Anwendungsfällen der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter sollen die allgemeinen Merkmale der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter allgemeingültig und übertragbar herausgearbeitet werden.

- 4) Wie können diese Aspekte bereits in der Planung und Bewertung von möglichen Arbeitsplätzen mit Mensch-Roboter-Kooperation berücksichtigt werden?

2 Überblick der Mensch-Roboter-Kooperation

2.1 Begriffe und Definitionen

Roboter

Der Begriff Roboter stammt aus dem Jahr 1920 und wurde erstmals in Karel Capeks Theaterstück „Rossums's Universal Robots“ als Diener des Menschen erwähnt (Capek, 1920). Capek beschreibt seinen Roboter als einen Maschinenmenschen, eine der menschlichen Gestalt nachempfundene Apparatur (Duden, 2017a), die rebelliert und die Menschen vernichtet (Capek, 1920).

Der Wortstamm findet sich weiterhin im tschechischen Wort „roboten“ wieder, welches im Deutschen „Frondienst“ bedeutet. Dieser Begriff wurde früher auch im deutschsprachigen Raum umgangssprachlich für „schwer arbeiten“ verwendet (Duden, 2017a; Duden, 1996, S. 626).

Im technischen Sinn wird ein Roboter als Automat oder Handhabungsgerät verstanden (ggf. mit Greifarmen ausgerüstet), der ferngesteuert nach Sensorsignalen oder einprogrammierten Befehlsfolgen anstelle eines Menschen bestimmte mechanische Tätigkeiten verrichtet (Duden, 2017a). Durch den programmierbaren Bewegungsablauf ist ein Roboter für verschiedene Tätigkeiten frei einsetzbar (Robot Institute of America, 1979).

Industrieroboter

Bei einem Industrieroboter handelt es sich um einen universell einsetzbaren Mehrzweck-Bewegungsautomaten, der automatisch steuerbar und frei programmierbar ist. Ein solcher Industrieroboter kann in mehreren Achsen und nach freier Bewegungsabfolge bewegt werden (EN ISO 8373: 1996, S. 2).

Am Endeffektor des Roboters können Greifer, Werkzeuge oder andere Fertigungshilfsmittel angeflanscht werden, um Handhabungs- und / oder Fertigungsaufgaben durchzuführen (VDI, 1990; EN ISO 8373: 1996, S. 2). Ein Endeffektor ist eine Vorrichtung, die speziell zum Anbringen von Werkzeugen und Ähnlichem an die mechanische Schnittstelle konzipiert ist, mit der der Roboter seine Aufgabe erfüllt (EN

ISO 8373: 1996, S. 3), beispielsweise ein Greifer, mit dem der Roboter seine geplanten Tätigkeiten ausübt.

Der Industrieroboter ist gewöhnlich nicht dazu befähigt, eine sichere Mensch-Roboter-Kooperation einzugehen. Es sind jedoch verschiedene Möglichkeiten bekannt, um einen Industrieroboter für die Mensch-Roboter-Kooperation zu befähigen. Beispiele hierfür sind eine Sensorführung oder eine manuelle Führung mittels eines Joysticks (VDI, 1990; DIN EN ISO 10218-2, 2012).

Kooperierender Roboter

In dieser Arbeit wird unter dem Begriff „kooperierender Roboter“ ein Roboter manipulator verstanden, der grundlegend dazu befähigt ist, die direkte Interaktion mit einem Menschen auszuführen. In der somit entstehenden Mensch-Roboter-Kooperation werden Mensch und Roboter nicht durch statische oder berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen getrennt, wodurch ein physischer Kontakt ermöglicht wird.

Für die sichere MRK muss eine von vier Betriebsarten im Kollaborationsraum mit entsprechenden Sicherheitsfunktionen ausgewählt werden (DIN EN ISO 10218, 2012, S. 46). Dies sind der sicherheitsbewerteter, überwachter Halt, die Handführung, die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung oder die Leistungs- und Kraftbegrenzung.

Die größte Anzahl im Markt eingesetzter MRK-Roboter werden durch die Regulierung von Geschwindigkeit und Kraft abgesichert und häufig als sensitive Roboter ausgeführt (Bauer et al., 2016, S. 19, 39). Ein solcher Roboter ist durch integrierte oder externe Sensorik befähigt, seine Umwelt feinfühlig zu erkennen. Ein sensitiver Roboter ist somit befähigt, einen Menschen feinfühlig durch Kontakt zu erkennen und auch filigrane Bauteile zu handeln.

In verschiedenen Zukunftsvisionen werden die sensitiven Roboter ferner intelligent dargestellt. Ein sogenannter MRK-Roboter ist befähigt, mit einem Menschen intelligent zu interagieren (DIN EN ISO 10218, 2012). Von diesen smarten Robotern wird eine intelligente Bewegungsbahn (künstliche Intelligenz) erwartet (vgl. Strassmann, 2012, S. 7), sodass er individuell und flexibel auf Veränderungen in seiner Umgebung reagieren kann (McKinsey, 2017b, S. 26). Dadurch können beispielsweise ungewollte Kontakte mit dem Menschen vermieden werden.

Die ebenfalls in der Literatur vorhandenen Begrifflichkeiten wie beispielsweise kollaborative Roboter oder Cobots¹ werden vernachlässigt.

mobiler Roboter

Die mobilen Roboter werden in zwei grundlegende Aufbauten kategorisiert: Die einen Roboter befinden sich auf einer manuell verschiebbaren Plattform, die von einem Mitarbeiter bewegt werden kann, die autonomen Roboter bewegen sich selbstständig frei im Raum.

Die Normung versteht unter einem mobilen Roboter einen „Roboter, der alle für seine Überwachung und Bewegung notwendigen Ausrüstungen (Energieversorgung, Steuerung, Antrieb) mit sich trägt“ (EN ISO 8373: 1996, S. 3). Ein manuell mobiler Roboter kann beispielsweise zwischen verschiedenen Produktionsstätten bewegt und hinsichtlich der Stückzahlenforderungen flexibel an verschiedenen Arbeitsplätzen eingesetzt werden.

Autonome Roboter werden häufig für logistische Tätigkeiten eingesetzt und transportieren Waren zwischen verschiedenen Bereichen, an denen sie Produkte aufnehmen (Quellen) und abgeben (Senken; Arnold et al., 2008, S. 222). Häufig sind dies ein Waren-Supermarkt (Quelle) und verschiedene Montageplätze (Senke).

Es existieren bereits Systeme, die eine solche mobile Transportplattform mit einem Roboterarm kombinieren (Abbildung 3). Dadurch ist das Gesamtsystem befähigt, an den verschiedenen Zielorten auch Handlingstätigkeiten analog eines einfachen, stationären Roboters durchzuführen. An den entsprechenden Quellen und Senken kann somit auf eine manuelle oder zusätzlich automatisierte Be- und Entladung verzichtet und die logistische Automatisierung wirtschaftlicher umgesetzt werden.

¹ Unter dem Begriff Cobot werden „intelligente, kraftverstärkende Manipulatoren“ (Arai, 2003, S. 2; vgl. Weidner, 2015) verstanden, die jedoch Aufgaben nicht selbstständig durchführen (Rötzer, 2003, S. 21).



Abbildung 3: KUKA KMR iiwa in der Getriebefertigung

Raumdefinition

Der maximale Raum ist der „Raum, der von den beweglichen Teilen des Roboters erreicht werden kann, wie vom Hersteller definiert, und zusätzlich der Raum, der vom Endeffektor und dem Werkstück erreicht werden kann“ (EN ISO 8373, 1996, S. 4).

Der eingeschränkte Raum ist der „Anteil des maximalen Raums, der durch die Begrenzungseinrichtungen wie Achsreduzierungen eingeschränkt ist [...]“ (EN ISO 8373, 1996, S. 5). Solche sicheren Begrenzungseinrichtungen können mechanischer oder digitaler Art sein.

2.2 Stand der Technik

Die Literatur- und Patentrecherche im Bereich der Interaktion von Mensch und Roboter zeigt größtenteils allgemeine Ergebnisse zur Schnittstelle von Mensch und Maschine. In diesem dynamischen Forschungs- und Entwicklungsgebiet werden daher neben formalen auch informelle Informationsquellen genutzt, um das Thema MRK auf dem aktuellsten Stand vorzustellen (Spath et al., 2010, S. 11).

Im Bereich der Mensch-Roboter-Zusammenarbeit liegen vorwiegend theoretische Erkenntnisse, wie Ergebnisse von Versuchen (Cencen et al., 2015, S. 3) beispielsweise unter Laborbedingungen im Virtual Reality Labor der Deutschen Gesetzlichen

Unfallversicherung (DGUV; vgl. Koppenborg, 2012, S. 32) oder in virtueller Realität (vgl. Ore, 2014) vor. Des Weiteren finden Forschungsaktivitäten im Bereich der humanoiden Roboter (vgl. Lehmann et al., 2013, S. 407), der autonomen Interaktion von Mensch und Roboter, beispielsweise im Forschungsprojekt SAPHARI (Flacco et al., 2015, S. 338-345) und der Entwicklungen von Robotern (Rosetta, 2015) statt.

Diese Untersuchungen betrachten die Interaktion von Mensch und Roboter lediglich allgemein ohne den Kontext einer Produktionsumgebung sowie nicht explizit unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik und der aktuell geltenden Normen DIN EN ISO 10218 (2012) und ISO/TS 15066 (2016).

Als anwendungsnah kann exemplarisch das EU-Forschungsprojekt *Lean Automation* (LIAA) herangezogen werden, in dem unter Führung von Industriepartnern und Forschungsinstituten Anforderungen und Voraussetzungen der Mensch-Roboter-Kooperation in verschiedenen Studien analysiert werden (Walz, 2018, S. 8). LIAA weist Maßnahmen aus, durch die Kosten gesenkt und Planungszeiten verkürzt werden können. Insbesondere wird die Programmierung von Robotern betrachtet und durch Standards optimiert, wobei gleichzeitig die Flexibilität der Roboteranwendungen erhöht wird (Walz, 2018, S. 9 f.).

Die bereits veröffentlichten Patente zielen größtenteils auf die Sicherheit von kooperierenden Robotern ab, indem ihre Bewegung in der dynamischen Umgebung sicher überwacht wird (vgl. Matthias & Ding, 2014, S. 5). In diesem Zusammenhang wird der Diskussion um die erlaubten Kontakte, möglicherweise auftretende Kräfte und daraus entstehende reversible Verletzungen, wie Prellungen und Quetschungen (Behrens et al., 2014, S. 3382), besondere Bedeutung zugeordnet. Es scheint sich um eine noch ungeklärte Grundsatzfrage zu handeln, ob Kontakte im Allgemeinen oder nur ungewollte Kontakte nicht tolerierbar sind² (Grüling, 2015; siehe Forschungsfrage 2).

² „Welches Risiko akzeptabel ist, entscheidet die Gesellschaft.“ (Michael Huelke, Leiter Referat „Neue Technologien, Mensch und Technik am Fraunhofer IPA, zitiert nach Strassmann, 2012, S. 7). Weiterhin sei die Toleranz für Kontakte bei einem privat angeschafften Staubsaugroboter deutlich höher, als bei einem industriellen Roboter am Arbeitsplatz (Strassmann, 2012, S. 7).

Praktische Untersuchungen zu den Auswirkungen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine im industriellen Anwendungsfeld von kooperierenden Leichtbau-Knickarmrobotern liegen z. Z. nicht vor. Aus diesem Grund werden für die theoretische Abhandlung dieser Arbeit auch Ergebnisse von Studien aus industriefremden Gebieten herangezogen, wie der Servicerobotik, sofern sich diese Ergebnisse auf die industrielle Zusammenarbeit von Mensch und Roboter übertragen lassen.

2.2.1 Stand der industrietauglichen Technik

Die heutigen, „smarten“ Entwicklungen (Gartner, 2018) im industriellen Umfeld basieren auf den Entwicklungen der Computer-integrated manufacturing (CIM) aus den 1980er Jahren (Heinze, 2015, S. 20).

Das Forschungsprojekt „CIM zwischen Anspruch und Wirklichkeit“ (1989) ergab, dass die CIM-Strategie technik- und automatisierungsorientiert betrachtet wurde. Anstatt den Menschen als wichtigsten Erfolgsfaktor zu berücksichtigen, wurde er als rein betrieblicher Produktionsfaktor angesehen (Köhl et al., 1989, S. 48; The New York Times, 1972, S. 38) und nur zu einem Viertel als relevanter Faktor wahrgenommen (Kemmner, 2013, S. 25).

Für die aktuellen industriellen Veränderungen ist von einer ähnlichen Verteilung der Erfolgsfaktoren auszugehen (Kemmner, 2013, S. 25). Die Vielzahl der industriell einsetzbaren Systeme lässt vermuten, dass die Technik die aktuelle Entwicklung, wie bereits in den 1980er Jahren, nicht einbremsen wird. Für den Erfolg der aktuellen industriellen Revolution sollte vielmehr die Vernetzung von Mensch und Maschine in den Vordergrund gestellt werden (Reddehase, 2019, S. 66; Heinze, 2015, S. 20), dabei sollte die Einbindung des Menschen gemäß seiner natürlichen Kompetenzen erfolgen (Rumsch et al., 2014, S. 6).

In dieser dynamischen Umwelt wird der Mensch mit neuen Anforderungen konfrontiert (Schmitz, 2019, S. 20), wobei der intelligente und der Technik übergeordnete Mensch im Vordergrund stehen soll (Soder, 2014, S. 9; Lüdtkke, 2015, S. 128). Diese Entwicklung geht mit dem Up-Skill-Effekt einher: Durch die Verlagerung von einfacher Arbeit zu einem Roboter obliegt dem Mitarbeiter ein größerer Anteil an höherwertiger Arbeit (Rumsch et al., 2014, S. 23).

Der Beginn der industriellen Robotik kann mit dem ersten Patent und dem ihm zugrundeliegenden „Unimation“-Roboter, auf das Jahr 1961 datiert werden (Devol et al.,

1961). Dieser zwei Tonnen schwere Roboter wurde zuerst bei General Motors in Trenton, USA, eingesetzt (Wolf et al., 2016, S. 61).

Die Sinnhaftigkeit zwischen der Funktionsteilung zwischen Mensch und Roboter, die einfachen und routinefähigen Aufgaben dem Roboter und komplexe Tätigkeiten dem Menschen zu überlassen, war bereits in den 80er Jahren Konsens (Nuber et al., 1989, S. 38) und könnte durch die Mensch-Roboter-Kooperation in einer neuen Form Wirklichkeit werden.

Ein gelungenes Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation setzte die BMW AG im Bereich der Komponentenfertigung um, bei der Mensch und Roboter in direkter Zusammenarbeit ein Ausgleichsgetriebe in einen Vorderachsabtrieb montieren (Nördinger, 2018, S. 3). Einige weitere industrielle Anwendungen der Mensch-Roboter-Kooperation liegen bereits vor (Bauer et al., 2016, S.41 ff.) und werden in den nächsten Jahren weiter ergänzt, denn sowohl Integratoren als auch Roboterhersteller befinden sich in einer Aufbauphase (Lind, 2018, S. 16).

2.2.2 Robotermodelle und Robotermarkt

Der Robotikmarkt zeichnet sich aktuell durch eine hohe Dynamik aus. Dies verdeutlicht sich beispielsweise durch die wachsende Anzahl von Robotermodellen und -herstellern (Ciupek, 2018, S. 18). Weiterhin werden die Auslegungen der Robotermodelle variantenreicher. Eine dieser Entwicklungen sind die zweiarmigen Robotermodelle (Abbildung 4), die sich durch einen menschenähnlichen Arbeitsradius für einen schnellen und flexiblen Einsatz eignen (Tontsch, 2015; Matthias & Ding, 2013, S. 7).



Abbildung 4: Zweiarm-Roboter der Fa. Epson

Neben den kleineren und leichteren Robotermodellen (Frutig, 2013, S. 44) sind auch Modelle mit höheren Reichweiten und Traglasten im Einsatz, die neue Anwendungsgebiete erschließen (Häuslein, 2018), siehe Abbildung 5.



Abbildung 5: Polierroboter mit 130 kg Traglast von Fa. Comau

Der aktuelle Fokus auf den Bereich der Robotik zeigt sich in der Übernahme des Roboterproduzenten Universal Robots durch Firma Teradyne für einen Betrag von 285 Mio. Dollar sowie zusätzlich leistungsabhängigen 65 Mio. Dollar (Wilk, 2018, S. 1)

und die Übernahme von 94,5% der Firma KUKA durch die chinesische Midea Group (Doll & Hegmann, 2018, S. 3). Ebenfalls wurde der Roboterhersteller Gomtec von der Firma ABB übernommen (Bonev, 2015, S. 2), um das Robotermodell Roberta neu als Single-arm YuMi in den Markt einzuführen (Knoll, 2018, S. 2).

Eine Auswahl von Robotermodellen mit einem industriegeprägten Ansatz findet sich in Anhang 1 (Ciupek, 2018, S. 18).

2.3 Beschreibung der Charakteristiken einer Mensch-Roboter-Kooperation

In diesem Abschnitt sollen die Charakteristiken³, die eine MRK beschreiben und beeinflussen, herausgefiltert werden (vgl. De Santis et al., 2007, S. 255). Diese werden in drei Hauptcharakteristiken unterteilt: den Roboter, den Menschen sowie den umgebenden Arbeitsraum (Abbildung 6). In den folgenden drei Abschnitten werden die Hauptcharakteristiken in ausgewählter Form beschrieben.

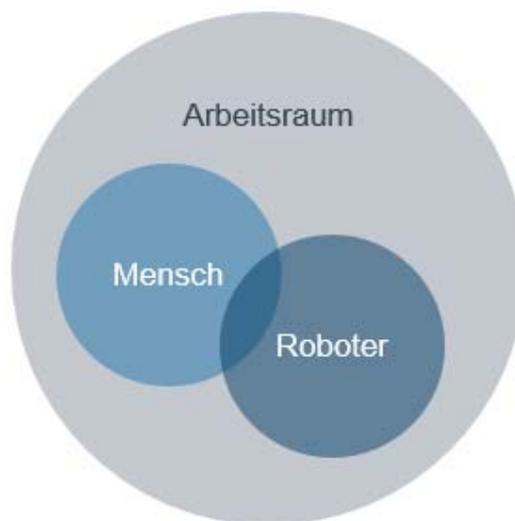


Abbildung 6: Charakteristiken der Mensch-Roboter-Kooperation

³ Als Charakteristik wird eine „treffende Schilderung der kennzeichnenden Merkmale einer Person oder einer Sache“ verstanden (Duden, 2019c).

2.3.1 Charakteristiken des Roboters

Dieses Kapitel stellt die Charakteristiken, die eine Roboteranwendung beschreiben, vor. Die grundlegenden Bestandteile eines Roboters sind als Überblick in Abbildung 7 dargestellt.

Dieses Beispiel einer Handhabungsaufgabe besteht aus einem Roboter, der auf einem Sockel aufgestellt ist. Am Endeffektor des Roboters befindet sich ein Greifmodul mit bauteilspezifischen Greiferbacken. Der Greifer benötigt eine Medienzuführung zur Aktuierung; beispielsweise wird der Greifer durch Druckluft angesteuert. Für die Erkennung der Bauteile in den Verpackungen (Teilezuführung) ist eine Kamera oder ein Laserscanner am Roboterkopf oder ortsfest in der Roboterzelle angebracht. Dadurch wird die Steuerung befähigt, die Bauteilpositionen im Verhältnis zu Umgebung und Roboterkinematik zu berechnen. Die Steuerung des Roboters ist weiterhin mit der zu beladenden Maschine, einem externen PC oder einem Fließband verknüpft.

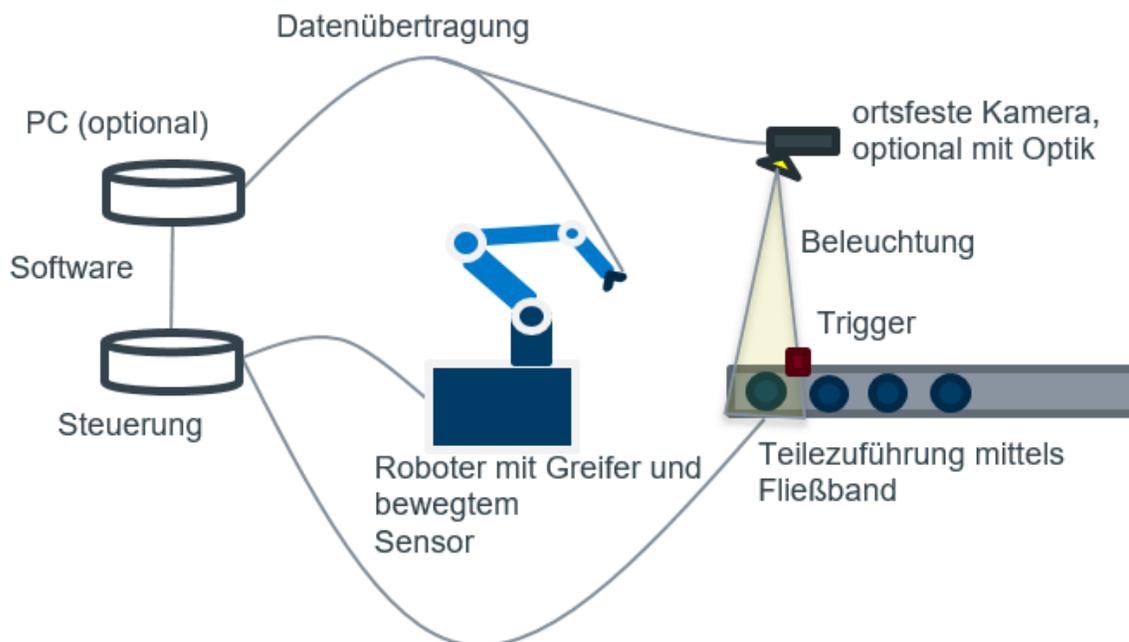


Abbildung 7: Bestandteile eines Roboterarbeitsplatzes
(vgl. Nesper, 2019, S. 7)

Neben diesen Bestandteilen einer Roboterapplikation (Abbildung 7) bestehen weitere Charakteristiken (Abbildung 8), die einen Roboter definieren. Diese wurden mittels Literaturrecherche in die vier Bereiche äußere Gestaltung, Sensitivität, Verfügbarkeit und

technische Realisierung untergliedert. Sie definieren einen MRK-fähigen Roboter, ihre Auslegung obliegt jedoch größtenteils den Roboterherstellern. Der äußeren Gestaltung wird in diesem Kapitel, aufgrund ihrer direkten Wirkung auf einen interagierenden Menschen, die größte Aufmerksamkeit geschenkt. Den ausgewählten und unten vorgestellten Charakteristiken wird der größte Einfluss auf die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter, entsprechend der wissenschaftlichen Fragestellungen, zugeordnet. Die weiteren, in Abbildung 8 dargestellten, Charakteristiken sind aufgrund der Vollständigkeit aufgelistet und werden vernachlässigt.

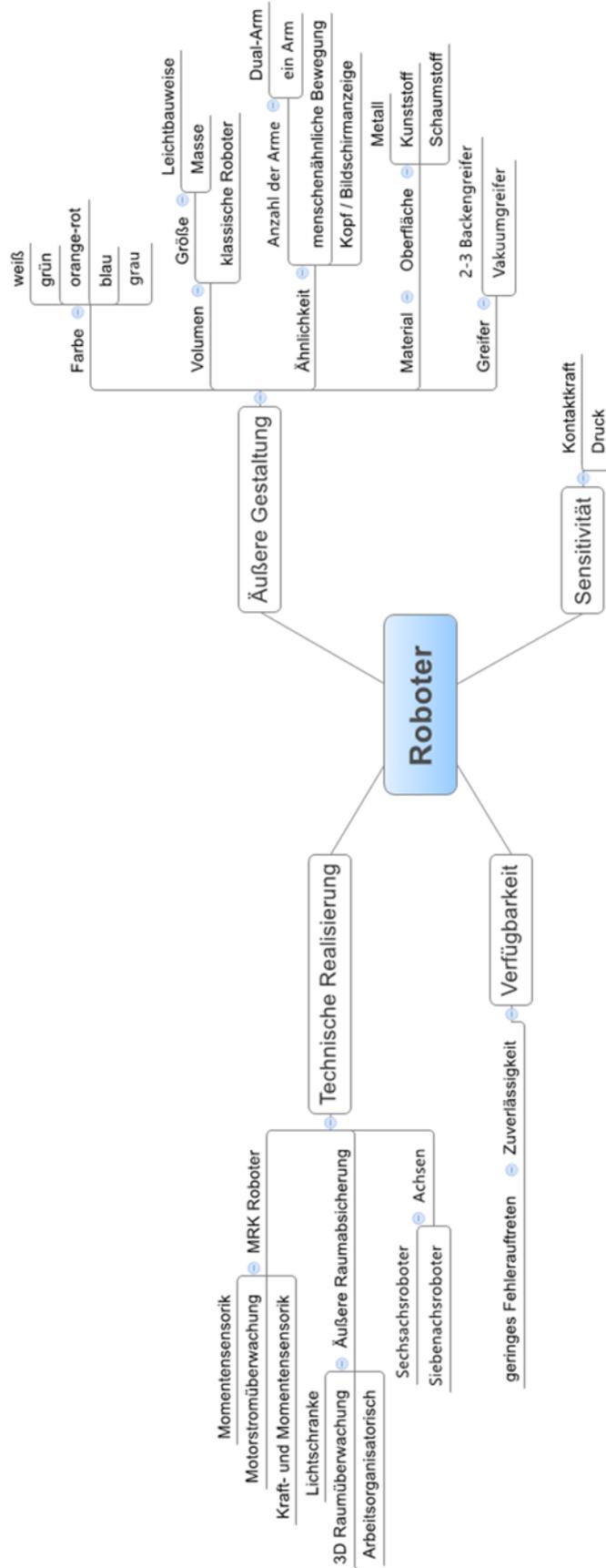


Abbildung 8: Charakteristiken eines Roboters

Äußere Gestaltung

Die äußere Gestaltung von Robotern spielte bisher hauptsächlich im Bereich der Servicerobotik eine Rolle, weniger im Bereich der Industrie. Durch das Zusammenrücken von Mensch und Roboter wurden vollkommen neue Konzepte der Robotik entwickelt, beispielhaft ist dafür das Modell YuMi von Firma ABB zu nennen (Müller, 2017).

Insbesondere das menschenähnliche Aussehen eines Roboters unterliegt großen Diskussionen, siehe Ähnlichkeit in Kapitel 2.3.1.

Der Einfluss, den ein Roboter auf einen Menschen ausübt, hängt von einer komplexen Kombination von verschiedensten Gestaltungsmerkmalen, wie seiner äußeren Gestalt, seinem Aussehen und Verhalten, ab (Rosenthal-von der Pütten, 2014, S. 137).

Farbe

Auf die farbliche Gestaltung der kooperierenden Roboter haben die meisten Hersteller der Systeme großen Wert gelegt. Die klassisch orangefarbenen Roboter der Fa. KUKA wurden beispielsweise durch einen Leichtbauroboter in Grau mit orangefarbenen Akzenten abgelöst und Firma Fanuc wechselt von einem konventionellen Gelb auf ein sicherheitsverkörperndes Grün. Viele der neuen Player auf dem Markt wählen eine moderne und ansprechende oder frei wählbare Farbgebung für ihre Modelle (Bendel, 2017, S. 31 & Stäubli, 2018, S. 5).

Dieser Fokus auf die Farbgebung der Produkte findet seinen Hintergrund in der Psychologie. Farben können als Reize wahrgenommen werden, die ein Aktivierungspotential der Aufmerksamkeit aufweisen (Berghaus, 2015, S. 72).

Größe / Volumen

Die Veränderung der Gestalt eines industrietauglichen Roboters lässt sich insbesondere an Größe und Volumen erkennen. Die Leichtbauweise und die filigranere Form eines kooperierenden Roboters sind, bedingt durch ihr vergleichsweise geringe bedrohliche Wirkung, wesentliche Merkmale der Akzeptanzerhöhung (Bendel, 2017, S. 31).

Ähnlichkeit

Das menschenähnliche Verhalten und Aussehen eines Roboters kann positive Effekte auf die Psyche des interagierenden Menschen (mentales Modell) haben (Severinson-Eklundh et al., 2002, S. 19; De Santis et al., 2007, S. 255, 261).

Nach Mori steigt die Akzeptanz eines Roboters mit dessen Zunahme menschlicher Gestalt bis zu einem gewissen Grad an, dann stürzt diese Akzeptanz in ein Tal hinab, das sogenannte Uncanny Valley (Mori, 2012, S. 1).

Bei einer Mensch-Roboter-Kooperation ist ein Leichtbauroboter in kompakter Bauform zu bevorzugen. Dabei soll auf bestehende Industriekomponenten zurückgegriffen werden (vgl. Thiemermann, 2005, S. 64).

Diese Theorie wurde von Firma ABB anhand des Zweiarml-Roboters YuMi evaluiert. In einem Versuchsaufbau wurden drei verschiedene Bewegungsmuster an einem Robotermodell YuMi gezeigt und dabei die Pulsfrequenz der Probanden aufgenommen. Dies sind ein menschenähnliches Bewegen des Ellenbogens, eine Ellenbogenposition gemäß optimaler Bahnplanung und eine stochastisch variierte Ellenbogenposition (Matthias, 2013, S. 10). Die statistische Auswertung zeigte eine deutlich reduzierte Pulsfrequenz der Probanden bei menschenähnlichem Bewegen des Roboterarmes (Matthias, 2013, S. 10).

Firma Fanuc bewirbt die Menschenähnlichkeit beispielsweise auf ihrer Homepage: Hier stellt sich der kooperierende Roboter in „Ich-Form“ als sicherer Helfer des Menschen vor (Fanuc, 2015). Einige Hersteller vergeben menschliche Namen für ihre Roboter, wie beispielsweise das Modell HelMo von Firma Stäubli (Hensel, 2017, S. 2), für bessere Akzeptanz durch eine „Humanisierung“ der Technik (Hinds et al., 2004, S. 174).

Blume (2014, S. 73) zeigte anhand eines menschenähnlichen Roboterkopfes, dass die optische Ähnlichkeit zu einem Menschen und das menschenähnliche Bewegungsverhalten im Median mit 4 von 5 Punkten positiv bewertet wird. Jedoch zeigt ein Ausreißer bei 1 von 5 Punkten ebenso, dass ein Roboter in menschenähnlicher Gestalt auch beängstigend wirken kann (Uncanny Valley).

Oberfläche des Roboters

In der MRK Form der Leistungs- und Kraftbegrenzung kommt der Oberfläche des Roboters eine besondere Bedeutung zu, denn die Reduzierung des Schweregrades von

Kollisionen kann durch das mechanische Design des Roboters beeinflusst werden. Das Modell LBR iiwa von Firma Kuka zeichnet sich beispielsweise durch eine Außenkontur aus, die jegliche Quetsch- und Scherkanten am Roboterarm ausschließt (vgl. Haag, 2015, S. 61).

Eine Einflussgröße ist ebenso die Reduzierung der Masse durch Nutzung von Leichtbaumaterialien oder die Umhüllung des Roboters mit nachgiebigen Strukturen wie einem Mantel aus Schaumstoff (De Santis et al., 2007, S. 255).

Sensitivität

Die Robotermodelle der einzelnen Hersteller, die sich der Kategorie Leistungs- und Kraftbegrenzung zuordnen lassen, zeichnen sich durch unterschiedliche Sicherheitskonzepte und -technologien aus. Die bewährten Verfahren sind die Überwachung des Motorstroms und die Gelenkmomenten-Sensorik. Die verschiedenen Technologien führen zu ungleichen Stufen der Sensitivität der einzelnen Modelle, die für jeden Anwendungsfall individuell zu prüfen sind.

Die ISO/TS 15066 (2016, S. 7) führt beispielsweise als Merkmal der Sensitivität die Möglichkeit an, den Roboter per Hand zu stoppen.

Achsen des Roboters

Auf die Gelenke eines Leichtbauroboters für den kooperierenden Betrieb kommen vollkommen neue Herausforderungen zu. Die kleine Baugröße der neuen Roboter fordert passende Gelenktechnik in minimaler Größe und Gewicht, Leichtgängigkeit und hoher Beweglichkeit (Surdilovic et al., 2018, S. 7). Trotzdem müssen die Gelenke die nötige Steifigkeit für die aufzunehmenden Momente und Kräfte mitbringen und der Roboter muss seine Bahnwiederholgenauigkeit einhalten (Reininger, 2016, S. 60).

Zusätzlich fordern die Normen der MRK das Weichstellen der Achsen des Roboters (siehe Abschnitt Sensitivität), damit sich ein bedroht fühlender Mensch jederzeit durch ein Beiseiteschieben des Roboters befreien kann. Ebenso darf der Roboter auch bei stärkeren Kollisionen oder im Handführmodus seine Positionsreferenzierung niemals verlieren.

Zusammenfassung Charakteristiken des Roboters

Diejenigen Robotermodelle, die sich für die Mensch-Roboter-Kooperation eignen, sind größtenteils in Leichtbauweise gebaut und von geringer Größe. Durch spezielle technische Gegebenheiten zeichnen sich diese Robotermodelle durch eine hohe Sensitivität aus, die sanfte Kontakte mit einem Menschen, siehe Fragestellung 2, erlauben.

Die, im Vergleich zum klassischen Industrieroboter, veränderte Gestaltung eines MRK-Roboters soll eine positive Reaktion des Menschen bewirken. Die Charakteristiken, die den Menschen als weiteren Interaktionspartner beschreiben, werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

2.3.2 Charakteristiken des Menschen

In der Mensch-Roboter-Kooperation wird der Mensch in einen völlig neuartigen Interaktionsraum integriert, von dem er bisher durch Schutzzäune oder berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen ausgeschlossen war (vgl. Ortmann & Guhlke, 2014, S. 1). Somit kommunizieren Mensch und Maschine zukünftig deutlich intensiver über die drei Interaktionsformen der Haptik, Optik und Akustik miteinander (vgl. Zühlke, 2012, S.227). Diese Sinneswahrnehmungen stellen einen Teil der Charakteristiken dar, welche die menschliche Komponente einer MRK beschreiben (Abbildung 9). Großen Einfluss zeigt der visuelle Sinneskanal auf, der in der Kognition und Verarbeitung der wahrgenommenen Reize mündet. Weiterhin werden die objektiven Eigenschaften des Menschen und die Sinnesphysiologie aufgegriffen, die eine Beschreibung und Erläuterung der Gedächtnisstruktur im Verarbeitungszyklus liefern.

Die physiologischen Reaktionen und die Kommunikation spielen in Hinblick auf die Fragestellungen dieser Arbeit eine vernachlässigbare Rolle.

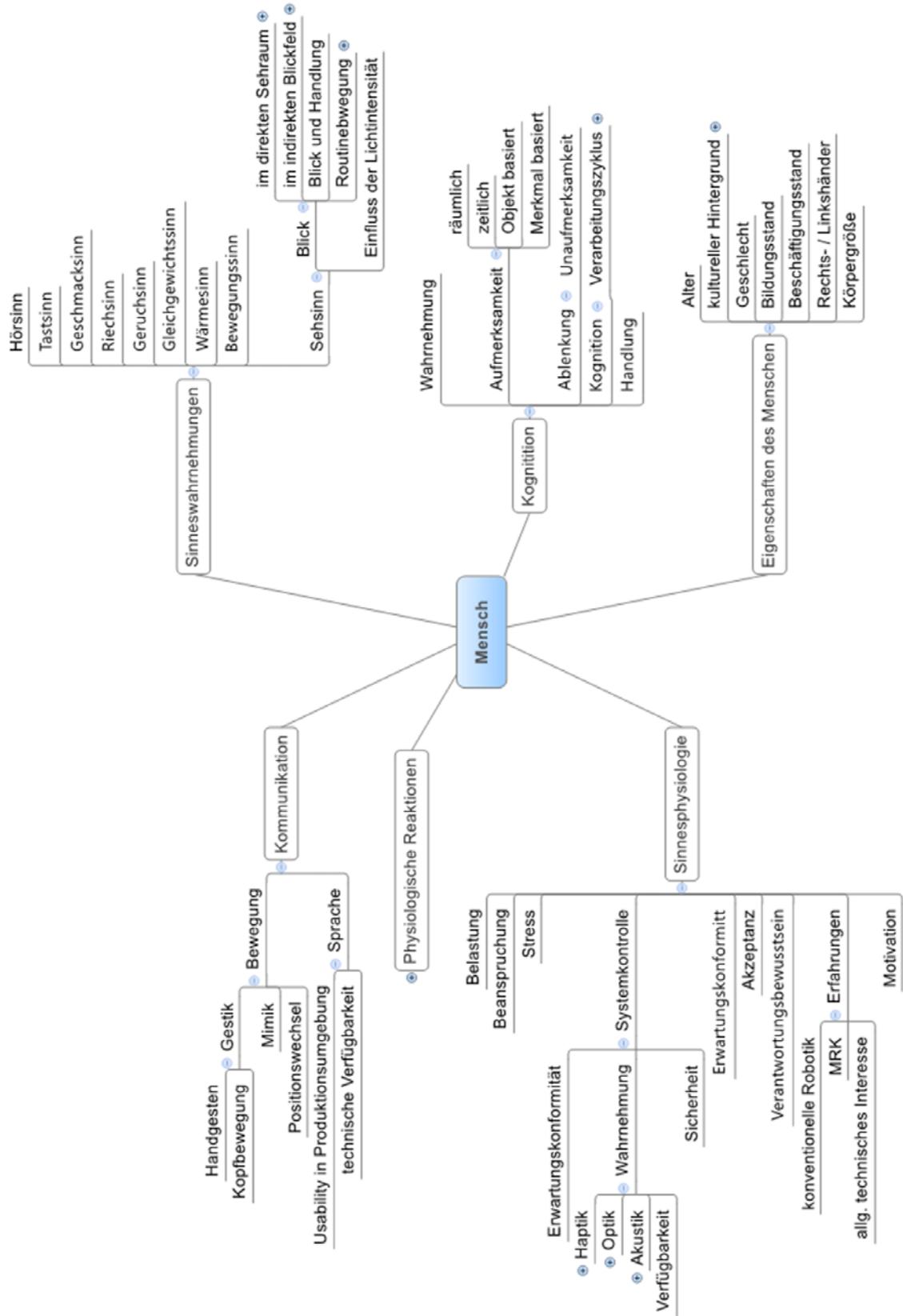


Abbildung 9: Charakteristiken des Menschen

Durch diese technologische Entwicklung können sich vielfältige Änderungen in den bekannten Arbeitsabläufen, -aufgaben und -zeiten, der Produkt- und Prozessqualität ergeben. Ebenso sind weitgreifend Verantwortlichkeiten und Hierarchien, Entgeltsysteme, Qualifikation und Personalentwicklung von den Veränderungen betroffen. Hieraus entsteht die Forderung nach einer sozial- und humanverträglichen Integration von Innovation (vgl. Ortmann & Guhlke, 2014, S. 1).

Haptik

Unter dem Begriff der haptischen Komponenten in Mensch-Maschine-Systemen fallen vielfältige Beispiele aus der Maschinenbedienung, insbesondere die Haptik von Knöpfen oder Displays (Zühlke, 2012, S. 227).

In der Mensch-Roboter-Kooperation bekommt der Aspekt der Haptik eine vollkommen neue Bedeutung, denn zum ersten Mal wird im Regelablauf eines Roboterprogramms der Kontakt zwischen Mensch und Roboter erlaubt. Dabei spielt die Oberfläche des Roboters, seine Formgebung, das Material, etc. eine große Rolle, wie bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert.

Akustik

Der auditive Interaktionskanal besteht in der klassischen Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) aus Signaltönen, die den Mitarbeiter auf einen besonderen Status der Maschine aufmerksam machen sollen (Zühlke, 2012, S. 227). Dies kann, wie in Abbildung 10 dargestellt, beispielsweise ein freifahrendes System sein, bevor es in eine größere Fahrstraße oder eine Engstelle einbiegt.



Abbildung 10: Autonome Plattform in der Komponentenfertigung

Neben den auditiven Kommunikationssignalen des Roboters müssen in diesem Kontext auch die weiteren Umgebungsgeräusche der Produktionsumgebung berücksichtigt werden. Konkrete Zukunftsvisionen, wie eine Spracherkennung, zur Interaktion des Menschen mit dem Roboter sind aktuell in der Literatur noch nicht genauer betrachtet.

Optik

Die visuelle Interaktion des Menschen mit dem Roboter ist ein Schwerpunkt dieser Dissertation. Insbesondere über den optischen Sinneskanal wird der Roboter durch den Menschen erfasst und hinsichtlich seiner Charakteristiken eingestuft. Ebenfalls wirken diejenigen Charakteristiken, die den gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Roboter beschreiben (Abbildung 16 auf S. 48) besonders auf den optischen Wahrnehmungskanal des Menschen ein.

Als einige Beispiele für die visuelle Auffassung seien die Geschwindigkeit des Roboters, seine Bewegungsrichtung, oder die Ablenkung durch den Roboter im peripheren Blickbereich des Menschen genannt.

Die weiteren Sinneskanäle werden aufgrund ihrer geringen Bedeutung für Tätigkeiten im industriellen Umfeld vernachlässigt.

Wahrnehmung

Unter Wahrnehmung wird die Aufnahme von Sinneseindrücken als erste Phase der Informationsverarbeitung verstanden, die durch Muster zur Planung einer Handlung verwendet wird (Gerke, 2015, S. 14; Schlick et al., 2010, S. 313).

Die menschliche Wahrnehmung besteht aus neuronalen Reizen, die bewusst oder unbewusst aufgenommen werden. Wahrnehmung muss daher immer im Kontext der Aufmerksamkeit und des Bewusstwerdens betrachtet werden. Bestimmte Reize können von dem Unterbewusstsein aufmerksam verfolgt oder durch eine Häufung von Reizen in die bewusste Wahrnehmung übergehen (Schmedding, 2012, S. 15).

Wahrnehmung lässt sich wissenschaftlich betrachtet in die autochthonen und verhaltensbezogenen Determinanten unterscheiden. Die autochthonen Determinanten beinhalten die eher unveränderlichen, „angeborenen“ Wahrnehmungseigenschaften einer Person, während sich die Verhaltensdeterminanten mit den weiteren psychischen Funktionen beschäftigen (Lilli, 1978, S. 19).

Nach der *Social-Perception Theorie* von Bruner und Postman ist die Wahrnehmung von den individuellen Erfahrungen einer Person abhängig. In diesem Sinne ist sie wandelbar, besitzt kontextbezogen einen funktionalen Charakter, unterliegt einer aktiven oder passiver Interaktion mit der Umwelt und enthält die entsprechenden Wechselwirkungen, die sich aus der Interaktion ergeben (Lilli, 1978, S. 19).

Der Ablauf der menschlichen Wahrnehmung lässt sich nach der *Hypothesentheorie der sozialen Wahrnehmung* nach Bruner und Postman beschreiben und findet in einem dreistufigem Zyklus statt, wobei eine Wahrnehmungshypothese bestätigt werden soll (Lilli, 1978, S. 25). In der ersten Stufe wird eine Hypothese bereitgestellt, die eine Vorhersage über das Eintreten eines Umweltereignisses trifft. Die zweite Stufe dient der Eingabe von Informationen über das Wahrnehmungsobjekt. In der dritten Stufe werden die Erwartungen aus der ersten Stufe mit den tatsächlichen Wahrnehmungen aus der zweiten Stufe verglichen, wodurch eine Bestätigung oder Wiederlegung der Hypothese erfolgt (Lilli, 1978, S. 25).

Auf die Vorstellung weiterer Theorien zur Wahrnehmung, wie beispielsweise die *Multiple Ressourcen Theorie* (Wickens, 2002), *Wickens vier Dimensionen der Informationsverarbeitung* oder *Broadbents Einkanal-Theorie*, wird aufgrund des Umfangs an dieser Stelle verzichtet.

Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeit beschreibt einen Zustand konzentrierter Bewusstheit (Becker-Carus, 2011, S. 229), der sich in Form zwei verschiedener Aufmerksamkeitssysteme zeigt: Die endogene (willentliche) und die exogene (reizgesteuerte) Aufmerksamkeit (Posner, 1980, S. 21).

Die Aufmerksamkeitsverteilung erfolgt in drei Formen:

- Die selektive Aufmerksamkeit filtert relevante Informationen für ein zielgerichtetes Denken und Handeln (Becker-Carus, 2011, S. 231).
- Eine geteilte Aufmerksamkeit liegt vor, wenn eine Verteilung auf verschiedene, nicht im Zusammenhang stehende Tätigkeiten erfolgt. Dies wird auch als Cocktail-Party-Phänomen bezeichnet (Becker-Carus, 2011, S. 231).
- Die erforderliche Aufmerksamkeit für Überwachungs- und Kontrollaufgaben ist die Daueraufmerksamkeit (Vigilanz). Eine gesteigerte Aufmerksamkeit, beziehungsweise das aktive und bewusste Konzentrieren auf ein Objekt zeichnet sich durch Aktivitätssteigerungen in den Bereichen des posterioren intraparietalen Sulcus und der peripheren Augenfelder aus (Rösler, 2011, S. 91). Bei der Daueraufmerksamkeit wird in längeren und monotonen Situationen bewusst die Aufmerksamkeit auf der Haupttätigkeit belassen und potentielle Ablenkungen sorgfältig ausgegrenzt. Eine fehlerfreie Vigilanz ist den meisten Menschen nur ca. 30 Minuten möglich (Becker-Carus, 2011, S. 249).

Die Aufmerksamkeit wird in die vier Arten der räumlichen, objekt-basierten, merkmalsbasierten und den zeitlichen Aspekt von Aufmerksamkeit unterteilt. Durch die Selektionsfunktion können diese Arten der Aufmerksamkeit kombiniert und priorisiert werden (Wentura & Frings, 2013, S.88).

Das Präferieren der Aufmerksamkeit erfolgt unter der Annahme, dass die menschliche Aufmerksamkeit einer strukturellen Kapazitätsbegrenzung unterliegt, d. h., dass die kognitiven Strukturen nur je einen Prozess verarbeiten können (Müller et al., 2015, S. 134). Ausgeschlossen von dieser Annahme sind einfache Prozesse, die perzeptiv ablaufen (Müller et al., 2015, S. 134). Dies ist beispielsweise durch Übung entfallende Informationsverarbeitung bei Routineaufgaben, die dann autonom abläuft (Müller et al., 2015, S. 152).

Alternative Annahmen der graduellen Kapazitätsbegrenzungen gehen von der Möglichkeit einer verteilten Aufmerksamkeit auf mehrere Aufgaben aus, auf welchen jedoch die Gesamtkapazität aufgeteilt wird (Müller et al., 2015, S. 140).

Durch eine Verschiebung kann sich der Fokus der Aufmerksamkeit verändern. Diese Verschiebung kann offen oder verdeckt stattfinden. Die Bewegung der Augen als offene Verschiebung ist ein guter Indikator für die verdeckte Bewegung der Aufmerksamkeit (Aubert, 1876, S. 633; Müller et al., 2015, S. 25).

Unaufmerksamkeit und Ablenkung

Für die Abgrenzung zwischen Unaufmerksamkeit und Ablenkung gibt es bisher keine eindeutige literarische Grundlage (Regan & Hallett, 2011). Caird und Devar (2007) definieren Unaufmerksamkeit als ausgelöst innerhalb des Menschen. Sie steht nicht in Konkurrenz zu anderen Reizen wie beispielsweise dem Abschweifen von Gedanken. Die Ablenkung hingegen wird durch externe Faktoren ausgelöst, wie das Klingeln des Smartphones, und konkurriert mit der ursprünglichen Aufgabe (Hackenfort, 2017, S. 3).

Nach Rasmussen (1986) spielt die Ausprägung der Ablenkung eine bedeutende Rolle, da diese den Grad der Aufmerksamkeitsverschiebung grundlegend beeinflusst. Auf der untersten Verarbeitungsebene werden fertigkeitbasierte Informationen und Reize verarbeitet. Während solcher, einfacher motorischer Tätigkeiten ist im Regelfall nicht mit merklichen Leistungseinbußen der Hauptaufgabe zu rechnen. Auf der mittleren, regelbasierten Ebene werden jedoch die in der Gedächtnisstruktur vorhandenen Erfahrungen und Konzepte abgerufen. Durch diesen kognitiven Vorgang kann die Leistung der Haupttätigkeit minimiert werden. Die oberste Verarbeitungsebene beschreibt wissensbasierte Handlungen, die auf komplexen Hirnaktivitäten beruhen und eine Haupttätigkeit deutlich beeinflussen können (Rasmussen, 1986, S. 82, 101-103).

Kognitive Informationsverarbeitung

Die kognitive Informationsverarbeitung verknüpft die vorgestellten medizinischen Zusammenhänge mit den menschlichen Verhaltensweisen und dient als elementare Grundlage für die Methoden der Blickbewegungserfassung.

Die Informationsverarbeitung wird vereinfacht in drei Phasen unterteilt. Die Informationsaufnahme (Input) dient dem Entdecken und Herausfiltern der entsprechenden Signale. Diese werden in der kognitiven Informationsverarbeitung ausgewertet und in der Informationsabgabe in eine Handlung (Output) übersetzt (Sträter, 2005, S. 108; Schlick et al., 2010, S. 287; Mandler, 1979, S. 284).

Der Begriff Kognition wird als die „Gesamtheit aller Prozesse, die mit dem Wahrnehmen und Erkennen zusammenhängen“ (Duden, 2017b) beschrieben und leitet sich aus dem lateinischen Wort „cognitio“ ab und bedeutet „Kennenlernen / Erkennen“ (Duden, 2017b).

Als Kognitionen nach Festinger (1957) werden beispielsweise Meinungen, Glaubensweisen und Wissensseinheiten verstanden (Frey, 1978, S. 244). Festinger unterscheidet dabei Kognitionen in irrelevanter Beziehung, Kognitionen die zusammenhangslos auftreten und Kognitionen in relevanter Beziehung, wenn diese in einem Zusammenhang miteinander stehen.

Die relevanten Kognitionen können sich gegenseitig bestätigen und ergänzen (konsonante Kognitionen) oder einander entgegengesetzt sein (dissonante Kognitionen). In Abhängigkeit der Höhe der kognitiven Dissonanz, kann diese zu psychologischen Unvereinbarkeiten führen (Frey, 1978, S. 244). Der kognitive Vergleich dieser Elemente findet innerhalb des Verarbeitungszyklus statt (Sträter, 2005, S. 108).

Der kognitive Verarbeitungszyklus beginnt mit der Wahrnehmung von Sinnessystemen und motorischen Systemen. Diese werden mit gedächtnisabhängigen Konzepten und Erfahrungen verglichen und mit den internen Zustandswerten von Aufmerksamkeit und Motivation (Handlungsbereitschaft) abgestimmt (vgl. Sträter, 2005, S. 108; Pape, 2005, S. 802). Der Abruf von codierten und gespeicherten Gedächtnisinformationen erfolgt personenbezogen und subjektiv, entsprechend der individuellen Wahrnehmung, die der Informationsaufnahme zu Grunde lag (Becker-Carus, 2011, S. 369).

Das Verarbeiten von Informationen wird in die kontrollierte und die automatische Verarbeitung unterteilt. Während das kontrollierte Verarbeiten eine hohe Konzentration erfordert, wird das automatische Verarbeiten ohne kognitiven Aufwand oder die Beanspruchung von Aufmerksamkeitsressourcen durchgeführt (Wentura & Frings, 2013, S. 86).

Bei dieser Verarbeitung handelt es sich um einen synaptischen Prozess, der im Zentralen Vergleicher, dem limbischen System, stattfindet (Klinke, 2005a, S. 623). Das limbische

System vergleicht⁴ die eintretenden Informationen und Reize (Wahrnehmung) mit der Gedächtnisstruktur, also den individuellen Konzepten und Erfahrungen einer Person. Die Informationen die im Bereich der bewussten Wahrnehmung und der Gedächtnisstruktur (Speicherung analysierter Bilder) verarbeitet werden sollen, werden vom CGL über die temporale Bahn in das Gedächtnissystem geleitet (Eysel, 2005, S. 705).

Die Informationen die im Bereich der bewussten Wahrnehmung und der Gedächtnisstruktur (Speicherung analysierter Bilder) verarbeitet werden sollen, werden vom CGL über die temporale Bahn in das Gedächtnissystem geleitet (Eysel, 2005, S. 705).

Der Vergleich des aktuellen Inputs und den vorhandenen Strukturen benötigt im Zentralen Vergleich ca. 100 ms. Aus diesem Vergleich resultieren sowohl die motorischen Handlungen als auch die Veränderungen des vegetativen Systems und die emotionalen Reaktionen. Der Verarbeitungszyklus nach Sträter (2005, S. 108) wird in Abbildung 11 gezeigt.

⁴ Menschliches Verhalten wird durch die informationsverarbeitenden Prozesse des zentralen und peripheren Nervensystems ermöglicht, die in neuronalen Netzwerken ablaufen. Enthaltene Informationen werden über das Axon einer Nervenzelle an weitere Neurone und die Effektorgane weitergeleitet (Klinke, 2005a, S. 612). Die Neuronen haben die Fähigkeit zur Informationsverarbeitung, die sich aus der Verknüpfung mit Rezeptoren und Effektoren sowie der besonderen Zellstruktur und ihren Fähigkeiten ergibt (Klinke, 2005a, S. 613).

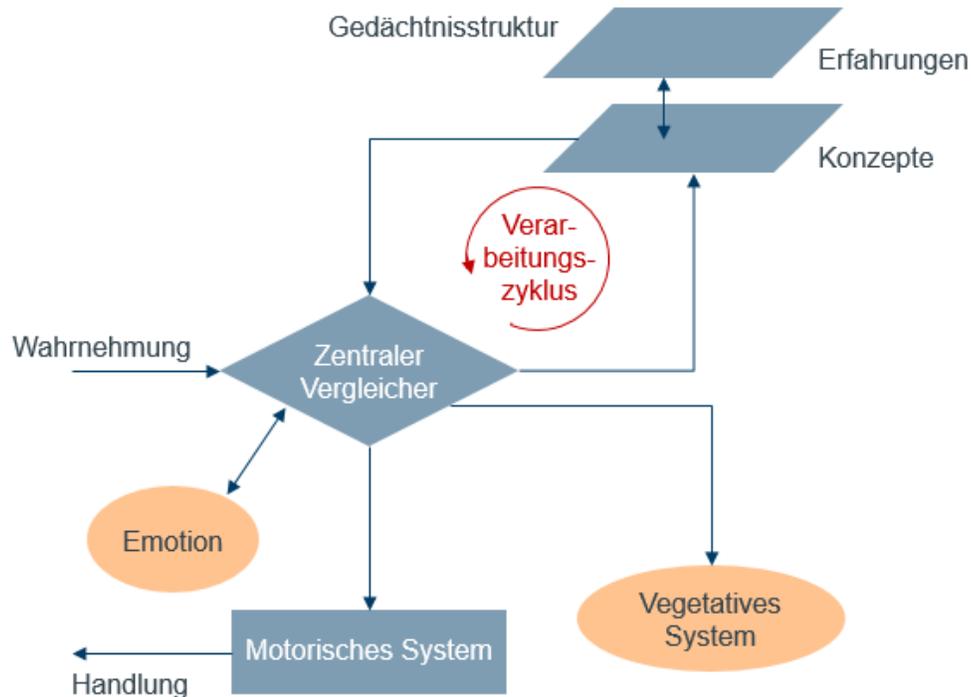


Abbildung 11: Verarbeitungszyklus
(nach Sträter, 2005, S. 108, übersetzt nach Sträter, 2012, S. 313)

Bei einem Ungleichgewicht der eingetretenen Information (Emotion) mit den vorliegenden Konzepten sendet das limbische System Neurotransmitter aus, wodurch der Körper vegetativ auf eine Diskrepanz vorbereitet wird (Sträter et al., 2012, S. 312). Bereits Maine de Biran (1766-1824) erkannte die Auswirkungen von Emotionen und ihre fördernde Wirkung auf bestimmte körperliche Veränderungen (Schmidt-Atzert, 1981, S. 16; Hehlmann, 1963, S. 130 f.).

Mit einer besonderen Rolle wirkt der emotionale Auslöser auf das limbische System ein. Durch einen funktionellen Rückkopplungskreis⁵ wird die emotionale Empfindung bezüglich der Information des Zentralen Vergleichers zu einer emotionalen Reaktion entwickelt. Aus diesem Ergebnis werden entsprechende Verhaltensweisen abgeleitet, die durch eine positive oder negative Rückkopplung geprägt sind (vgl. Sträter, 2005, S. 108; Pape, 2005, S. 807). Das resultierende Verhalten geht bei positiven Ausgang mit

⁵ Papez-Kreis Emotionssystem, parallel zu den Strukturen des limbischen Systems (Pape, 2005, S. 807).

Glückshormonen und im negativen mit Angsthormonen einher (Sträter et al., 2012, S. 313).

Emotion ist ein motivationaler Zustand, der durch den Eingang einer Wahrnehmung und deren kognitiven Gehalt entsteht (Becker-Carus, 2011, S. 487).

Nach der *Lehre von Affekten* von Juan Luis Vives (1492-1540) steht die Emotion in einer Wechselwirkung zum Zentralen Vergleicher und beeinflusst sowohl die Sinneswahrnehmung wie auch das Verhalten (Schmidt-Atzert, 1981, S. 15; Hehlmann, 1963, S. 61 f.). Die Wirkung der Emotion kann dabei aktiv oder passiv in den Verarbeitungszyklus einfließen (Schmidt-Atzert, 1981, S. 16; Hehlmann, 1963, S. 130 f.). Das Auftreten von Emotion lässt sich in drei verschiedene Ebenen, der physiologischen, der motorischen und der kognitiven Ebene beschreiben (Becker-Carus, 2011, S. 488; Schmidt-Atzert, 1981, S. 26).

Der dritte und letzte Teil der Informationsverarbeitung ist die Informationsabgabe, die resultierende Handlung. Die Reaktion, die aus der Informationsverarbeitung entsteht, hängt von fünf Faktoren ab (Herkner, 1975, S. 89):

- Die Komplexität der Reaktion bestimmt sich durch die Anzahl an Handlungsalternativen und steht im direkten Zusammenhang mit der Reaktionszeit. Die konsonanten Kognitionen laufen schneller ab als dissonanten (vgl. Herkner, 1975, S. 89).
- Erwartungskonforme Handlungsalternativen sind schneller in der Gedächtnisstruktur abrufbar und führen daher zu weniger Verarbeitungszyklen als unerwartete Alternativen (vgl. Herkner, 1975, S. 89).
- Die Kompatibilität beschreibt die Übereinstimmung zwischen der Reaktion und der passenden, erwarteten motorischen Handlung, beispielsweise der Übereinstimmung des Fahrens eines PKWs nach rechts und dem Lenken nach rechts (vgl. Herkner, 1975, S. 89).
- Die Geschwindigkeit und Genauigkeit eines Vergleichs stehen zueinander in Konkurrenz. In einer kürzeren Zeit kann nur eine geringere Anzahl an Handlungsalternativen betrachtet werden (vgl. Herkner, 1975, S. 89).
- Die Rückgabe eines Feedbacks ist ein wichtiger Bestätigungsfaktor. Insbesondere bei ungeübten Handlungen ist eine positive Rückmeldung über den Prozess essentiell (Wickens & Hollands, 2000, S. 21, 185; Hempel, 2014, S. 13). Eine

mögliche negative Rückkopplung lässt sich auf den Vergleich mit den persönlichen Erfahrungen und Konzepten zurückführen. Zeigt dieser eine Diskrepanz, d. h. einander ausschließende Alternativen oder Konzepte, liegt ein kognitiver Konflikt vor (vgl. Herkner, 1975, S. 89).

Übertragung des Verarbeitungszyklus auf die Mensch-Roboter-Kooperation

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die vorgestellten medizinischen und psychologischen Zusammenhänge auf die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter übertragen. Für die vorliegende Aufgabenstellung ist besonders interessant, wie sich die menschliche Informationsverarbeitung in der Zusammenarbeit mit einem Roboter verhält.

Der idealisierte Regelkreis von Thiernemann (2005, S. 19) kombiniert den menschlichen Verarbeitungszyklus modellhaft mit dem Roboterverhalten. Der Regelkreis der MRK (Abbildung 12) stellt die Kognition in den Mittelpunkt der menschlichen Ursache-Wirkungs-Komponenten. In diesem idealisierten Regelkreis erhält der Roboter mittels Überwachungsfunktion Informationen über die Motorik des Menschen, wodurch die Bewegung des Roboters reguliert wird. Die Bewegung des Roboters wird vom Menschen durch dessen Aufmerksamkeit und Wahrnehmung aufgenommen. Die gewonnenen Informationen werden verarbeitet (Kognition) und lösen die physiologische Aktivierung, beispielsweise einen erhöhten Puls, als auch Emotionen wie Angst aus. (Thiernemann, 2005, S. 19). Aus diesen Parametern wird die menschliche Handlung (Motorik) eingeleitet, auf die der Roboter wiederum mittels Überwachungsfunktion reagieren soll (Thiernemann, 2005, S. 20).

Sowohl physiologisch aktiviert, d. h. emotional, als auch motorisch findet eine Rückmeldung über den Zentralen Vergleicher statt, die zu einer positiven oder negativen Rückkopplung führt.

Nomura, Kanda und Suzuki (2005, S. 6) zeigen in ihrer Untersuchung, dass Menschen mit negativer Einstellung gegenüber Robotern häufiger vermeiden, mit ebendiesem in Kontakt zu treten. Die negative Einstellung zu Robotern ist in der klassischen Robotik einer der stärksten psychologischen Faktoren, der den Menschen davon abhält, mit dem Roboter zu interagieren (Nomura et al., 2005, S. 2). Dieses Verhalten wird durch die allgemeine Verhaltensliteratur bestätigt, denn Emotionen sind ein bedeutender Faktor der zwischenmenschlichen Kontaktfreudigkeit (Wolf, 2016, S. 115).

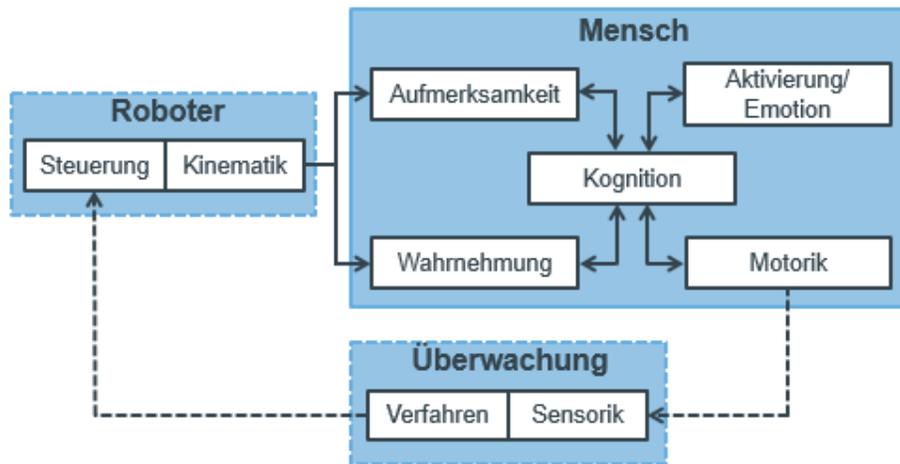


Abbildung 12: Idealisierter Regelkreis der direkten MRK
(vgl. Thiernemann, 2005, S. 19)

Während der Ausführung einer Arbeitstätigkeit liegt die Aufmerksamkeit des Mitarbeiters auf seiner Tätigkeit. Dadurch kann eine reizgesteuerte Aufmerksamkeitsverschiebung durch eine unerwartete und schnelle Roboterbewegung auftreten (vgl. Thiernemann, 2005, S. 34).

In einer hochdynamischen Umgebung, erhöht sich die Wahrnehmung des Menschen, um seine motorischen Handlungen auf die schnell verändernde Umgebung anpassen zu können (Wentura & Frings, 2013, S. 58). Farb-, Muster- und Bewegungsreize werden in verschiedenen Strukturen parallel verarbeitet. Die Einteilung findet im primären, visuellen Kortex statt (Eysel, 2005, S. 705).

Menschen nehmen während der Interaktion untereinander auch die Aufmerksamkeit ihres Gegenübers wahr und können somit optimal aufeinander reagieren. In der direkten Zusammenarbeit von Mensch und Roboter kann die Wahrnehmung und Verarbeitung der Aufmerksamkeit des Menschen durch eine intelligente Robotersteuerung eine sinnvolle und gegebenenfalls notwendige Eigenschaft sein. In einer intelligenten Interaktion von Mensch und Roboter kann der Roboter somit die wahrscheinlichen nächsten Schritte des Menschen voraussehen und proaktiv darauf reagieren (vgl. Blume, 2014, S. 14; Koczula, 2018, S. 40). Dieses zukünftige Szenario wird in Abschnitt 4.3.6 genauer beschrieben.

Eigenschaften des Menschen

Neben der soeben dargestellten Funktionsweise des Auges und den kognitiven Eigenschaften des Menschen, sind bei der Betrachtung des menschlichen Verhaltens auch die äußeren und allgemeinen Eigenschaften zu berücksichtigen. Eine Auswahl der Eigenschaften, die aus der Literatur als relevant für die Aufgabenstellung hervorgeht, wird weiterhin vorgestellt (vgl. Abbildung 9).

Alter

Das Alter eines Menschen kann einen Einfluss auf dessen Erfahrungen und Konzepte haben. Jüngere Menschen reagieren im Allgemeinen positiver auf neue Technologien und somit auch auf die neuartigen Roboter. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass deren Erfahrungen häufig weniger stark negativ geprägt sind (Rumsch et al., 2014, S. 20).

Im Bereich der Servicerobotik zeigt sich, dass ältere Menschen zunächst abneigender auf neue Technologien, insbesondere Roboter, reagieren, sofern diese ihre tägliche Arbeit übernehmen sollen. Diese Einstellung wandelt sich jedoch, wenn durch den Einsatz des Roboters die persönliche Autonomie im täglichen Leben beibehalten werden kann (Reich & Eyssel, 2013, S. 124; Beer et al., 2011, S. 14). Gerade bei entsprechender Einstellung und guten Erfahrungen kann die Leistungsfähigkeit älterer Mitarbeiter sehr groß sein (Stach, 2015, S. 5).

Während Befragte zwischen 15 und 24 Jahren zu 79% eine positive Einstellung gegenüber Robotik aufweisen, sinkt diese Einstellung mit dem Alter auf 62% bei Befragten, die älter als 55 Jahre sind (Reich & Eyssel, 2013, S. 124). Die Altersgruppe von über 65 Jahren unterscheidet sich in ihrer Einstellung nicht von den Befragten zwischen 40 und 65 Jahren.

Kultureller Hintergrund

In verschiedenen Kulturen zeigt sich ein spezifischer Grad von Technologieakzeptanz. Dieser ist beispielsweise in Asien, insbesondere in Japan deutlich ausgeprägter als in Deutschland (Renn, 2014, S. 2 & Krebs, 2005, S. 2).

Laut einer Studie der Europäischen Kommission (nachfolgend mit EK abgekürzt) erfreuen sich in Asien besonders menschenähnliche und „niedliche“ Robotervarianten großer Beliebtheit (Nomura et al., 2006, S. 6), in den USA gelten Serviceroboter als Prestigeprodukt (Renn, 2014, S. 5), wohingegen Europäer in Robotern eine werkzeugartige Maschine sehen (Rumsch et al., 2014, S. 24; EK, 2012, S. 4).

Abbildung 13 zeigt, in welchem Grad ein Serviceroboter und ein Industrieroboter dem europäischen Verständnis von Robotik entsprechen.

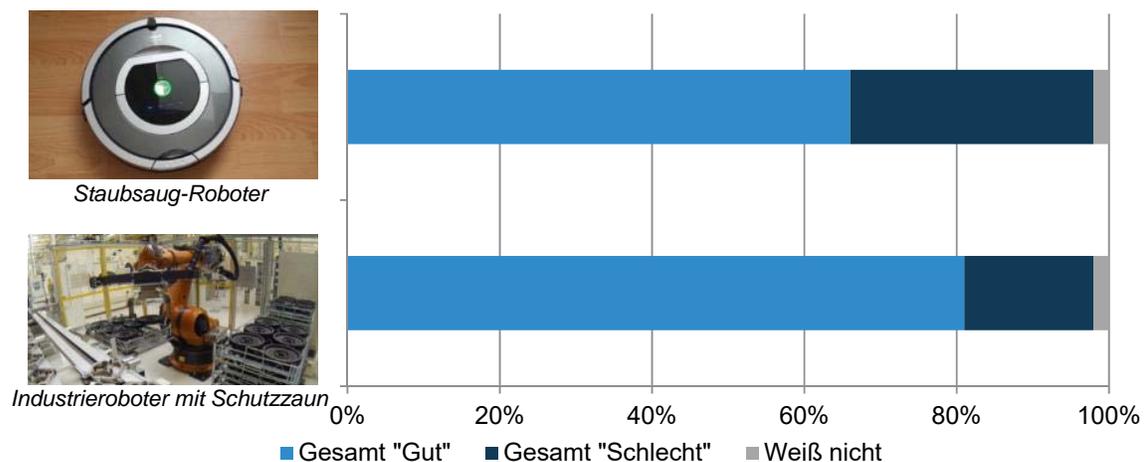


Abbildung 13: Europäische Zustimmung zur Robotik
(vgl. EK, 2012, S. 4)

Die Europäische Kommission (2012, S. 5) weist aus, dass 6% der befragten Bürger einen Industrieroboter an ihrem Arbeitsplatz nutzen oder genutzt haben, ebenfalls 6% haben Erfahrungen mit Robotern im Haushalt.

Geschlecht

Die soziodemografische Betrachtung weist aus, dass Männer zu 33% an wissenschaftlichen Entdeckungen „sehr interessiert“ sind, Frauen nur zu 18%. Diese Tendenz zeigt sich ebenfalls in der positiven Einstellung zu Robotern, die bei Frauen bei 65% und Männern bei 76% liegt (EK, 2012, S. 4; Reich & Eyssel, 2013, S. 124).

Demgegenüber steht die NARS-Studie (*Negative attitude toward robots scale*) aus Japan, die statistisch signifikant aufweist, dass Frauen eine geringere negative Einstellung zu Robotern haben als Männer.

Die Diskrepanz, die sich aus den beiden Studien ergibt, resultiert aus den unterschiedlichen Vorstellungen eines Roboters (siehe kultureller Hintergrund). Da die Basis der Untersuchungen nicht übereinstimmt und der Aspekt des kulturellen Hintergrunds in den Untersuchungen dieser Arbeit nicht betrachtet wird, wird den divergenten Aussagen an dieser Stelle keine weitere Bedeutung zugemessen.

Bildungsstand

Die Europäische Kommission (2012, S. 4) zeigt auf, dass das technische Interesse der Bürger mit dem Grad des Bildungsabschlusses steigt. Bei Bürgern, die ihren höchsten Schulabschluss im Alter von 16 Jahren erlangten, liegt das Interesse an Technik bei 13%. Dahingegen steigt der Anteil bei Schulabschlüssen im Alter von mindestens 20 Jahren auf 37% (EK, 2012, S. 4). Der Bildungsstand stellt den größten Einfluss auf die Akzeptanz von Robotersystemen dar (EK, 2012, S. 18).

Bei der Betrachtung des Komfortgefühls bei Roboterunterstützung am Arbeitsplatz liegen Deutsche mit 48% Wohlgefühl nahe dem europäischen Durchschnitt (EK, 2012, S. 16), siehe Abbildung 14.

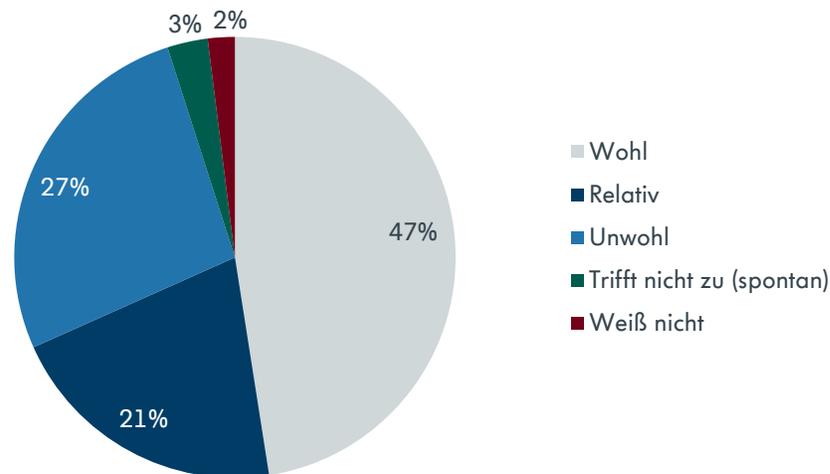


Abbildung 14: Komfortgefühl der EU-Bürger bei Roboterunterstützung am Arbeitsplatz, z.B. in der Produktion (EK, 2012, S. 16)

Die soziodemografische Analyse zeigt jedoch, dass das Wohl-Gefühl bei Bürgern, die ihre Schulausbildung mit 15 Jahren abgeschlossen haben, nur bei 32% liegt, bei Bürgern, die ihren Abschluss mit mind. 20 Jahren erreicht haben, bei 60%.

Dies korreliert mit dem Risiko der Substitution durch einen Roboter bei geringem Bildungsstand (siehe Abschnitt 1.1.3). Die Mitarbeiter mit geringerem Bildungsabschluss, die häufiger manuelle Tätigkeiten in der Produktion durchführen und zukünftig mit Robotern zusammenarbeiten sollen, zeigen eine größere Besorgnis bezüglich Robotereinsätzen.

Beschäftigungsstand

Das positive Bild von Robotik ist stark von dem Beschäftigungsstand und –umfeld abhängig. Unter den leitenden Angestellten weisen 82% der Befragten eine positive Meinung zu Robotern auf, wohingegen dieser Anteil unter Hausfrauen und –männern nur bei 57% liegt (EK, 2012, S. 7).

Dieser Zusammenhang lässt sich auch unter dem Aspekt der Wahrscheinlichkeit durch einen Computer oder einen Roboter ersetzt zu werden, betrachten. Nach Abschnitt 1.1.3 besteht eine negative Korrelation zwischen dem Risiko der Substitution durch einen Roboter und dem Beschäftigungsstand (Brzeski & Burk, 2015, S. 1; Dengler & Matthes, 2015, S. 7).

Belastung und Beanspruchung

Unter der Belastung wird die Summe aller erfassbaren Einflüsse verstanden, die äußerlich auf den Menschen wirken. Diese Wirkung kann sowohl physischer wie auch psychischer Art sein (Richter, 2000a, S. 2).

Die psychische Beanspruchung wird definiert, als der „Grad der Ausschöpfung der Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten durch bestimmte Belastungen“ (Rohmert, 1984, S. 197). Diese Beanspruchung resultiert personenbezogen aus den Wechselwirkungen der äußeren Belastung (z. B. Arbeitsaufgabe oder Arbeitsumgebung) und den individuellen Voraussetzungen des Menschen (Pfendler, 1990, S. 158). Die psychische Beanspruchung kann einerseits zur Überforderung andererseits auch zur Unterforderung eines Menschen führen (Richter, 2000a, S. 2).

Die EN ISO 10075-2 (2000) bietet Gestaltungsgrundsätze zur Reduzierung psychischer Beanspruchung an. Demnach sollen beispielsweise Daueraufmerksamkeit und häufige, eintönige Wiederholungen vermieden und Tätigkeitswechsel gefördert werden.

Nach der Betriebssicherheitsverordnung (§ 3 Gefährdungsbeurteilung, 2015) ist bei der Verwendung von Arbeitsmitteln, wie es auch ein Roboter sein kann, die physische und psychische Belastung des Mitarbeiters zu berücksichtigen. Kaum erforscht ist bisher, inwieweit die Beanspruchung abhängig von der Auslegung der Roboterbewegung, dem Bewegungsverhalten und der Bewegungsrichtung (siehe Abschnitt 2.3.1), ist.

Stress

Stress wird durch unübliche und extreme Situationen hervorgerufen und kann Auswirkungen auf die Aufmerksamkeit und strategische Entscheidungen haben. Bereits geringe Anzeichen von Stress weisen Reaktionen auf (Rasmussen, 1986, S. 169), wie den Anstieg des Pulses oder die Frequenzänderung des Blinzeln. Physiologische Reaktionen treten nicht nur bei starker Emotionalität auf, sondern insbesondere bei körperlicher Belastung, wodurch bei der Messung oder Beobachtung dieser Reaktionen ein Zuordnungsfehler zu berücksichtigen ist (Schmidt-Atzert, 1981, S. 53). Diese physischen Reaktionen⁶ des Körpers sind erfassbar und messbar (Richter, 2000b, S. 4), wodurch sie sich als vergleichendes Merkmal in praktischen Untersuchungen eignen.

Verschiedene Studien, wie Nomura, Kanda und Suzuki (2005), zeigen, dass während der Mensch-Roboter-Interaktion die Robotergeschwindigkeit Stress hervorruft und sich negativ auf die Leistungsfähigkeit des Menschen auswirkt. Bei einer höheren Robotergeschwindigkeit sinkt die allgemeine und aufgabenbezogene Konzentration des Probanden, da er sich auf die Bewegungen des Roboters konzentriert (Koppenborg et al., 2013, S. 417).

⁶ Beispielsweise: Herzfrequenz (Richter, 2000a, S. 3), Blutdruck (Richter, 2000a, S. 3) & Erröten (Schmidt-Atzert, 1981, S. 53) oder Blässe des Gesichts (Schmidt-Atzert, 1981, S. 67), Ausschüttung von Cortisol und Adrenalin (Richter, 2000a, S. 3), Puls (erhöhter Puls) (Thiemermann, 2005, S. 21), Kopfschmerzen (Richter, 2000a, S. 4), Konzentrationsstörungen (Richter, 2000a, S. 4), Schlafstörungen (Richter, 2000a, S. 4), Reizbarkeit (Richter, 2000a, S. 4), Vorzeitige Müdigkeit (Richter, 2000a, S. 4), Magenschmerzen (Richter, 2000a, S. 4), Magenschleimhautentzündungen (Richter, 2000a, S. 4), Flache Atmung (Schmidt-Atzert, 1981, S. 53), feuchte Hände (Schmidt-Atzert, 1981, S. 53), Zittern der Hände oder des gesamten Körpers (Schmidt-Atzert, 1981, S. 67), Schwitzen (Schmidt-Atzert, 1981, S. 53), Hitzeempfindungen (Schmidt-Atzert, 1981, S. 67), Muskelspannung (Schmidt-Atzert, 1981, S. 65), Augenblinkfrequenz (Schmidt-Atzert, 1981, S. 66), Fingerpulsvolumen (Schmidt-Atzert, 1981, S. 66), Gänsehaut (Schmidt-Atzert, 1981, S. 67)

Bei diesen Untersuchungen muss zusätzlich die Bewegungsrichtung des Roboters betrachtet werden, da Bewegungen, die sich von dem Menschen entfernen und quer zu ihm verlaufen, schneller sein dürfen, ohne dass eine erhöhte Beanspruchung des Menschen stattfindet (Ostermann, 2014, S. 47).

Systemkontrolle

Koppenborg et al. (2013, S. 719) zeigen, dass die Autonomie der Roboterbewegung ebenfalls zu einer höheren Beanspruchung des Menschen führt. Die mit der Autonomie des Roboters einhergehende unerwartete und nicht wiederholende Bewegung, kann von einem interagierenden Menschen als Kontrollverlust wahrgenommen werden und somit einen Stressfaktor darstellen (Braune, 2015, S. 12). Daraus können Auswirkungen auf den Menschen resultieren, wie eine langsamere Aufgabenbearbeitung und eine höhere Fehlerquote (Braune, 2015, S. 12) und sind daher zu vermeiden (Volkswagen AG, 2015, S. 20).

Reich & Eyssel vermuten, dass der Wunsch nach Kontrolle über das System zur Kompetenzmotivation führt, d. h. die Fähigkeit zur Kontrolle und Vertrautheit mit dem Robotersystem lassen zusätzliche Motivation entstehen (Reich & Eyssel, 2013, S. 124). Im Bereich der Serviceroboter konnte in der Studie von Reich und Eyssel (2013, S. 127) jedoch kein signifikanter Einfluss durch den Wunsch nach Kontrolle über den Roboter nachgewiesen werden.

Erwartungskonformität

Eine vorhersehbare Bewegung des Roboters ist eine angekündigte Roboterbewegung oder bestenfalls eine Roboterbewegung, die erst durch eine bewusste Anforderung des Menschen beginnt. Die Partizipation an dem Prozess sowie die Kontrollmöglichkeit steigern die Akzeptanz des Systems (Schuster, 2013, S. 119). Weiterhin wird ein höheres Sicherheits- und Komfortempfinden ermöglicht (Braune, 2015, S. 12; Koppenborg et al., 2013, S. 419). Thiemermann (2005, S. 79) konnte in seinen Untersuchungen keinen Zusammenhang des Sicherheitsempfindens mit dem Alter, Geschlecht oder der Körpergröße der Probanden darlegen.

Akzeptanz

Die technologische Akzeptanz ist die positive Einstellung eines potentiellen Nutzers gegenüber einer neuen Technologie. Die Akzeptanz kann intentioneller Art sein, d. h. der Nutzer plant, die neue Technologie einzusetzen. Erst die Handlungs-Akzeptanz zeigt das tatsächliche Interagieren des Nutzers mit der neuen Technologie (Beer et al., 2011, S. 6). Die Roboterakzeptanz wird in dieser Dissertation als ein Bestandteil der allgemeineren Technologieakzeptanz bewertet. Das positive Verständnis von EU-Bürgern hinsichtlich Servicerobotern korreliert mit dem Interesse „an wissenschaftlichen Entdeckungen und technologischen Entwicklungen“. Technisch sehr interessierte Menschen hatten zu 86% ein positives Verständnis von Robotern. 42% der Bürger gaben an, über kein technisches Interesse zu verfügen (EK, 2012, S. 7).

Der Akzeptanz von Robotersystemen und der mit ihnen einhergehenden Digitalisierung stehen grundsätzlich drei Befürchtungen gegenüber: Arbeitsplatzverlust, Kontrollverlust (Entmündigung) und Beziehungsverlust (Renn, 2014, S. 2).

Einige ausgewählte Möglichkeiten, diesen Ängsten entgegenzuwirken und die Akzeptanz eines Robotersystems zu steigern, sollen in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

Die Akzeptanz neuer Technologien in der Produktion ist zu hohem Anteil von ihrer Industrietauglichkeit und Prozessstabilität sowie dem Nutzen für die Mitarbeiter abhängig. Aus diesem Grund sollte für den Einsatz eines kooperierenden Roboters ein Arbeitsplatz ausgewählt werden, an dem Tätigkeiten von dem Roboter übernommen werden, die bei den Mitarbeitern der Fertigung „unbeliebt“ sind. Der somit hohe wahrgenommene individuelle Nutzen und die Annehmlichkeiten, durch die Entlastung einer monotonen und / oder anstrengenden Tätigkeit, kann die Akzeptanz des Systems erhöhen und die subjektive Einstellung zu dem Roboter positiv beeinflussen (Schuster, 2013, S. 119). Ein individueller Nutzen kann beispielsweise die Reduktion der Arbeitsbelastung oder die Erweiterung der Flexibilität in dem Arbeitsablauf sein (Holzträger, 2012, S. 97).

Roboter, die zusätzlich an einem bestehenden Arbeitsplatz integriert werden, sollen keine Konkurrenz, sondern eine sinnvolle Ergänzung für den Mitarbeiter darstellen (Freitag et al., 2016, S. 17).

Verantwortungsbewusstsein

Verantwortungsbewusstsein ist die Fähigkeit einer Person, Verantwortung für etwas oder jemanden zu übernehmen (Duden, 2019a).

Hinds, Roberts & Jones (2004, S. 174) untersuchen innerhalb einer Studie mit 292 Probanden Auswirkungen auf das Verantwortungsbewusstsein bei der Zusammenarbeit mit einem Roboter. Der Vergleich zwischen der Zusammenarbeit mit einem untergeordneten, maschinenähnlichen Roboter und einem gleichgestellten, menschenähnlichen Roboter zeigte einen höheren Grad des Verantwortungsbewusstseins bei der Zusammenarbeit mit dem maschinenähnlichen Roboter (siehe äußere Gestalt in Abschnitt 2.3.1).

Erfahrung

Erfahrung kann durch Wahrnehmungen, Empfindungen, Erlebnisse sowie Routine entstehen und dient als Grundlage für die Erkenntnis und dem Klüger werden (Duden, 2019b).

Nach dem Verarbeitungszyklus (Sträter, 2012, S. 313) wird die Wahrnehmung mit diesen Konzepten und Erfahrungen, die in der Gedächtnisstruktur hinterlegt sind, verglichen. Übertragen auf die neuartige Robotik ist die Reaktion eines Anwenders somit von seinen vorhandenen Erfahrungen mit Robotern und seiner Aufgeschlossenheit gegenüber Neuem geprägt (De Santis et al., 2007, S. 255).

Abbildung 15 zeigt, dass EU-Bürger zu 70% positiv gegenüber Robotern eingestellt sind.

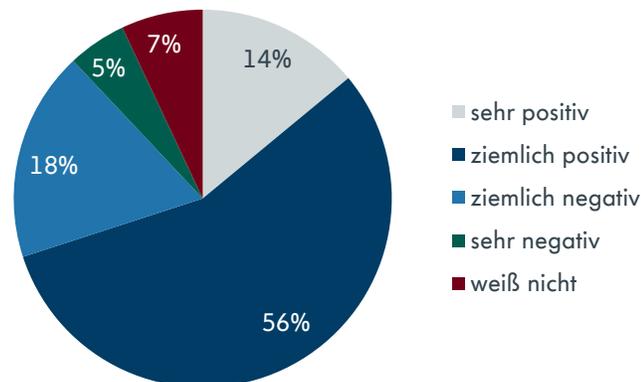


Abbildung 15: Die Meinung der EU-Bürger über Roboter (EK, 2012, S. 6)

Bei EU-Bürgern, die bereits Erfahrungen mit Robotern haben, liegt die positive Einstellung gegenüber Robotern mit 88% deutlich über dem Durchschnitt von 70% (EK, 2012, S. 7).

Bei dem ersten Kontakt von industrieerfahrenen Mitarbeitern mit einem kooperierenden Roboter ist jedoch mit einer negativen Rückkopplung zu rechnen, da sich das Bild eines konventionellen Roboters nicht mit den kleinen und filigranen, neuen Modellen deckt. Die Mitarbeiter, die mit konventionellen Robotern negative Erfahrungen assoziieren, werden Bedenken, insbesondere hinsichtlich der Sicherheitsstruktur, äußern.

Die Einstellung zu Robotern kann beispielsweise mittels der *Negative Attitudes towards Robots Scale* (Nomura et al., 2005, S. 3) ermittelt werden. Eine zugrundeliegende Untersuchung aus praktischem Versuch mit einem menschenähnlichen Roboter und vierzehnteiligem Fragebogen untermauert, dass die negative Einstellung und Angst gegenüber Robotern zu einer Vermeidungsstrategie bezüglich einer Interaktion mit Robotern führt (Reich & Eyssel, 2013, S. 124; Nomura et al., 2005, S. 2).

Persönliche Einstellungen und Erfahrungen, in negativer und positiver Ausprägung, können das Verhältnis einer Person zu der Mensch-Roboter-Kooperation beeinflussen. Als Beispiel sei an dieser Stelle das Sicherheits- und Kontrollempfinden genannt, das mit der Erfahrung und Gewöhnung eines Menschen zu einem möglichen geringeren Abstand zwischen den Interaktionspartnern führen kann (Thiemermann & Uffelen, 2004, S. 6). Durch die Einrichtung verschiedener Modi (beispielsweise Anfänger, Fortgeschritten, Erfahren) können solche erfahrungs- und gewöhnungsabhängigen Parameter an die Fortschritte des Mitarbeiters angepasst werden (Thiemermann & Uffelen, 2004, S. 7). Die Auswertung der Bewegungsgeschwindigkeit und -muster des Mitarbeiters und eine Veränderung der Modi können eine automatische Anpassung an die Bedürfnisse des Mitarbeiters ermöglichen (vgl. Matthias et al., 2009, S. 4).

Zusammenfassung der Charakteristiken des Menschen

Die Vorstellung der Charakteristiken des Menschen beruht in diesem Kapitel auf seiner Sinneswahrnehmung und den weitergehenden kognitiven Vorgängen. Als bedeutendste Einflussgröße auf die Informationsverarbeitung wird die Wahrnehmung festgehalten, die grundlegend auf den visuellen Eingang zurückzuführen ist. Eine solche Wahrnehmung einer Ablenkung und die Verschiebung der Aufmerksamkeit stellen sich als elementare Aspekte der Zusammenarbeit eines Menschen mit einem Interaktionspartner heraus. Sie

sollen anhand des Blickverhaltens in den späteren Versuchen genauer betrachtet werden und Teil der Beantwortung der vorliegenden Fragestellungen sein. Weiterhin werden ausgewählte objektive und subjektive Eigenschaften des Menschen vorgestellt, die als Einflussgrößen im Verarbeitungszyklus zu betrachten sind. Die darauffolgend vorgestellten Merkmale des Menschen in Zusammenhang mit den Studienergebnissen der Europäischen Kommission in Hinblick auf die Akzeptanz von Robotern sollen die Grundlage für die nachstehende Erstellung eines Fragebogens darstellen.

Dieses Kapitel zeigt auf, in welcher Form eine Interaktion bei einem Menschen messbar wird. Im nächsten Abschnitt wird daher die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter beleuchtet. Diese Charakteristiken, welche die Zusammenarbeit innerhalb eines Arbeitsraumes beschreiben, sollen im Anschluss in die Untersuchungen aufgenommen werden.

2.3.3 Charakteristiken der Arbeitsumgebung von Mensch und Roboter

Die in den beiden vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Charakteristiken beschreiben den Roboter und den Menschen jeweils allein. Innerhalb dieses Kapitels werden die beiden Interaktionspartner erstmals in der Arbeitsumgebung in einen Zusammenhang gesetzt. Ein solcher Arbeitsplatz, an dem ein Roboter eingesetzt wird, der mit einem Menschen interagieren soll, weist diverse zusätzliche Charakteristiken auf.

Die industrielle Arbeitsumgebung zeichnet sich durch diverse Einflussfaktoren auf den Menschen, wie Vibration, schwankendes Klima, Staub, Öle sowie laute Geräusche aus (BMFW, 2015, S. 4). Bei der ergänzenden Installation eines kooperierenden Roboters ist dessen potentieller zusätzlicher Einfluss auf den Menschen zu berücksichtigen.

Durch eine sinnvolle und menschenorientierte Arbeitsplatzgestaltung soll das Layout eines Arbeitsplatzes beispielsweise in Bezug auf Sichtbarkeit, Reichweite, Kraft, Haltung und Komfort des Bedieners optimal gestaltet sein (Gerke, 2015, S. 34). Solche Charakteristiken, die bei der Planung und ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung einer Mensch-Roboter-Kooperation zu berücksichtigen sind, werden nachfolgend vorgestellt.

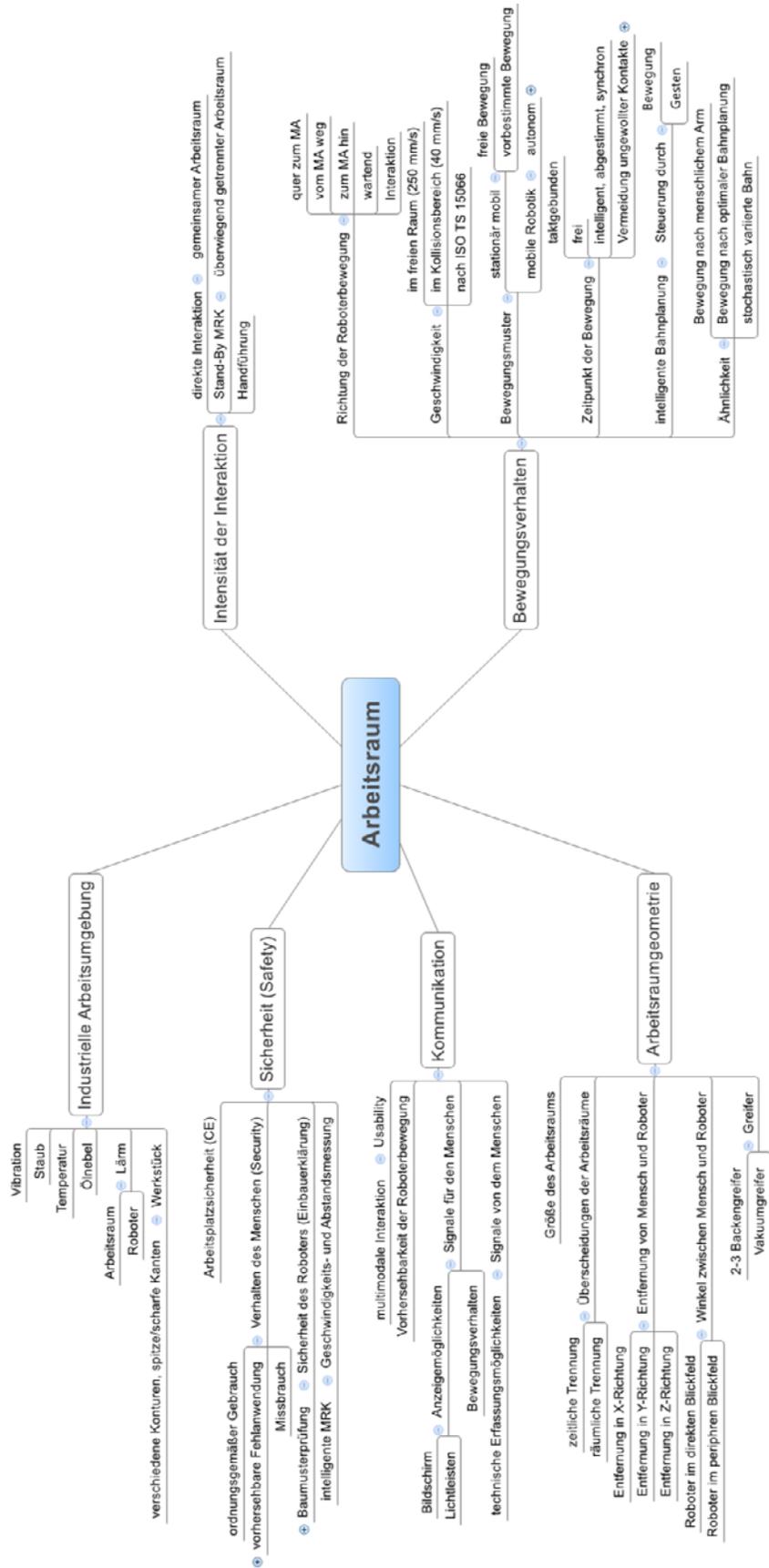


Abbildung 16: Charakteristiken des Arbeitsraums

Insbesondere auf das Bewegungsverhalten geht das folgende Kapitel ausführlicher ein, da die Bewegung einen deutlichen Einfluss auf die herausgefilterten Merkmale des Menschen aufweist.

Intensität der Mensch-Roboter-Kooperation

Unter dem Begriff der Mensch-Roboter-Kooperation werden verschiedene Formen der Interaktion von einem Menschen mit einem Roboter verstanden. Der Grad der Intensität dieser Zusammenarbeit hat dabei einen großen Einfluss auf die Wirkung, die der Roboter auf den interagierenden Menschen ausübt, siehe Abbildung 17.

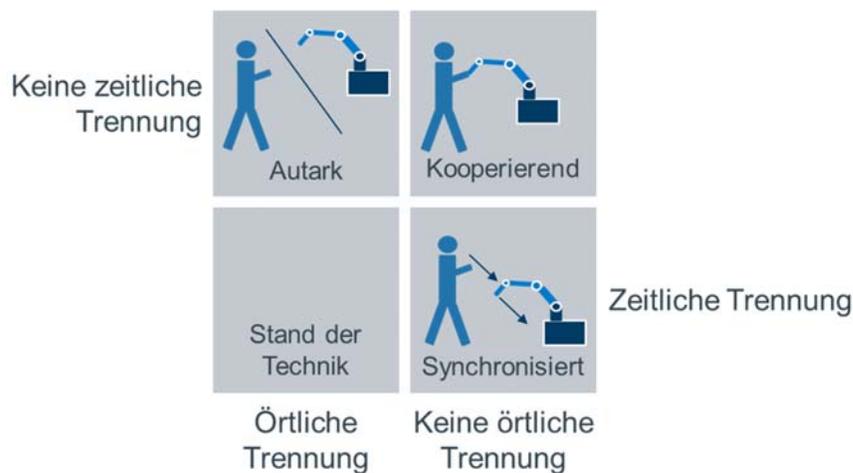


Abbildung 17: Kombination aus zeitlicher und örtlicher Trennung (vgl. Thiernemann, 2005, S. 43)

Für die Ermittlung des Grades der Interaktion ist die zeitliche und örtliche Trennung von Mensch und Roboter ausschlaggebend. Der Interaktionsgrad ist beispielsweise deutlich höher, wenn Roboter und Mensch gemeinsam und gleichzeitig an einem Produkt arbeiten und kooperieren. Entsprechend ist der Interaktionsgrad vergleichsweise geringer, wenn Mensch und Roboter nur ohne trennende Schutzeinrichtungen nebeneinander oder nacheinander (autark oder synchronisiert) arbeiten (Takeda et al., 1997 zit. in Thiernemann, 2005, S. 43).

Bewegungsmuster

Das Bewegungsmuster setzt sich aus der Bewegungsrichtung, der Bewegungsgeschwindigkeit und dem Abstand zwischen Mensch und Roboter zusammen. Das Bewegungsmuster eines Roboters hat großen Einfluss auf die Charakteristiken des Menschen, der sich in der unmittelbaren Nähe des Roboters aufhält.

Insbesondere ist zu differenzieren, ob sich der Roboter in immer gleichem Muster und Bewegungsabläufen bewegt oder ob er frei verfährt. Zu erwarten ist, dass eine Bewegungsbahn mit hohem Wiedererkennungswert zu geringerer Ablenkung führt, als die freie Bewegung (Thiemermann, 2005, S. 35; Stach, 2015, S. 17).

Für eine MRK ist daher eine gleichmäßige und antizipierbare Roboterbewegung sinnvoll (Thiemermann, 2005, S. 46). Eine solche vorhersehbare, erkennbare und logisch nachvollziehbare Bewegung des Roboters soll das Sicherheitsempfinden und die Systemkontrolle des interagierenden Menschen erhöhen (siehe Abschnitt 2.3.2; Hülke, 2015, S. 12).

Der Zeitpunkt einer Roboterbewegung kann ebenfalls zu verschiedenen Auswirkungen auf die Arbeitsabläufe und das Zusammenspiel mit dem Menschen führen. Für eine optimale Zusammenarbeit ist die Austaktung des Roboters elementar und seine Anpassung an den Arbeitsablauf empfehlenswert.

Geschwindigkeit

Besonders der Geschwindigkeit wird in Zusammenhang mit der Mensch-Roboter-Entfernung in vielen Quellen ein hoher Einfluss zugeschrieben. Neben der erwartungsgemäßen steigenden Beunruhigung durch das Gefährdungsempfinden eines Menschen in Interaktion mit einem sich schnell bewegendem Roboter (Thiemermann, 2005, S. 76) zeigen Forschungen in der virtuellen Realität auch eine verminderte Arbeitsleistung bei sich langsam bewegendem Roboter (Naber, 2013, S. 423).

Die Geschwindigkeiten, die bei einem kollaborierenden Betrieb anwendbar sind (bis 750 mm/s), werden als „sehr langsam“, „langsam“ und „mittel“ wahrgenommen (Thiemermann, 2005, S. 75).

In der Studie von Arai et al. (2010, S. 7) werden Bewegungsgeschwindigkeiten von 250, 500 und 1000 mm/s untersucht. Die betrachteten physiologischen Merkmale weisen

bereits bei einer Geschwindigkeit ab 500 mm/s eine Beanspruchung der Testpersonen aus (Arai et al., 2010, S. 7).

Beschleunigung

Eine Beschleunigung bis 3000 mm/s² wird von Probanden als „sehr langsam“, „langsam“ und „mittel“ wahrgenommen, wobei sehr große Überlappungen zwischen diesen Kategorien vorliegen (Thiemermann, 2005, S. 76).

Die Beschleunigung hat große Relevanz auf das Sicherheitsempfinden des Menschen.

Um diesem Sicherheitsempfinden Rechnung zu tragen, ist das Beschleunigungsverhalten von MRK-Robotern sehr gering konzipiert. Die Sensorik dieser Roboter leitet bei schnellen und ruckartigen Bewegungen einen sicheren Stopp ein (UR, 2014, S. 16).

Wie Thiemermann (2005, S. 76) zeigt fällt Menschen das Einschätzen von Beschleunigungen sehr schwer, weshalb dieses Kriterium für das persönliche Sicherheitsempfinden nicht verwendet werden sollte (Thiemermann, 2005, S. 77).

Das Beschleunigungsverhalten wird daher in dieser Dissertation vernachlässigt.

Mensch-Roboter-Entfernung (vgl. Mensch-Arbeitsraum-Entfernung)

Die praktischen Untersuchungen von Thiemermann (2005, S. 73) zeigen einen linearen Zusammenhang bei dem Wahrnehmen von Entfernung zwischen Mensch und Roboter. In seinen Studien untersuchte Thiemermann die Auswirkungen verschiedener Annäherungswinkel, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Roboters auf das Sicherheitsempfinden von Probanden (Thiemermann, 2005, S. 72 ff.).

Weiterhin konnte Koppenborg (2013, S. 419) in einem virtuellen Szenario zeigen, dass die erlebte Anstrengung von Probanden zwischen einer geringen und einer hohen Geschwindigkeit signifikant ansteigt.

Eine Studie der University of Tokyo (Arai et al., 2010) ermittelte bereits verschiedene physische Reaktionen, die ein interagierenden Roboter bei einem Menschen hervorruft. Da insbesondere im asiatischen Raum eine höhere Akzeptanz menschenähnlicher Roboter vorherrscht, wurde in der Studie ein Zweiarmer Roboter mit 60 cm langen Armen eingesetzt. In den Versuchen wurde unter anderem der Abstand (1, 1,5, 2 m) variiert. Mittels physiologischer Daten (galvanische Hautreaktion, Muskelaktivität und Eye-

Tracking) wurde ermittelt, dass die Belastung des Menschen mit einer Verringerung des Abstands zwischen Mensch und Roboter, der Größe und einer Unvorhersehbarkeit und Unnatürlichkeit der Bewegung des Roboters steigt. Die Unnatürlichkeit der Bewegung resultiert aus der optimalen Bahnplanung der beiden Manipulatoren, die sich an dem menschenähnlichen Robotermodell von einer menschlichen Armbewegung unterscheidet.

Nomura, Kanda und Suzuki (2005, S. 9) zeigen in ihrer Untersuchung statistische Tendenzen, dass der individuelle Abstand, den Probanden zu einem Roboter wählen mit dem sie interagieren, über die Untersuchung hinweg abnimmt, da das Vertrauen in den Roboter ansteigt. Die Autoren unterscheiden bei dieser Theorie dahingehend, ob die Probanden den Roboter erstmalig betrachten, oder sich bereits an ihn gewöhnt haben (Nomura et al., 2005, S. 9).

Richtung und Winkel der Kooperationspartner und der Bewegung

Weiterhin lässt sich das Bewegungsverhalten des Roboters durch den Winkel, in dem Mensch und Roboter zueinander stehen, als relatives Verhältnis zueinander beschreiben. Die optimale Wahrnehmung des Roboters findet bei einer Bewegung quer zum Menschen, d. h. in einem 90° Winkel statt (Thiemermann & Uffelen, 2004, S. 5; Thiemermann, 2005, S. 33, 47). Thiemermann (2005, S. 59, 60) platziert den Roboter in diversen Montagekonzepten immer mittig vor dem Werker, wobei es sich immer um einfache Stationen handelt.

Die Aufmerksamkeit auf den Roboter wird gesteigert, wenn sich dieser in Richtung des zentralen Gesichtsfelds (Fovea) bewegt, mittig in der Fovea ist die Aufmerksamkeit auf den Roboter am größten (Thiemermann, 2005, S. 47).

Weiterhin liegt bei einem großen Annäherungswinkel (bis 90°) ein hohes Sicherheitsempfinden vor, das sich mit kleiner werdendem Annäherungswinkel (bis 0°) stetig reduziert (Thiemermann, 2005, S. 75).

Mensch-Roboter-Kommunikation

Zwischen Mensch und Roboter sollte eine Kommunikation stattfinden, durch die der Mensch Informationen über die nächsten Schritte des Roboters erhält (Schmitz, 2019, S. 20) und diese als vorhersehbar wahrnimmt (siehe Systemkontrolle in Abschnitt 2.3.2).

Dies ist beispielsweise mittels visueller oder haptischer Rückmeldungen durch eine Signallampe, Geschwindigkeitsreduzierung, Vibration oder eine Bildschirmanzeige möglich (vgl. Haddadin et al., 2010, S. 700).

Usability / Softwareergonomie

Die Usability eines Systems stellt einen elementaren Faktor für die Nutzerakzeptanz dar (Schlick et al., 2018, S. 513). Dies gilt auch für das Steuerungssystem eines Roboters (Helms, 2006, S. 55), das durch die Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungs-fähigkeit, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Individualisierbarkeit und Fehlertoleranz (DIN EN ISO 9241-110, 2006) beschrieben wird.

In umgekehrter Weise zeigt die Praxis, dass eine fehlende Anwenderfreundlichkeit die Hauptursache für Manipulation und Fehlanwendung wie das Überbrücken von Sicherheitseinrichtungen darstellt (DGUV, 2011, S. 71).

Greiftechnik

Der Greifer eines kooperierenden Roboters bildet eine wichtige Schnittstelle zum Menschen. Gleichzeitig birgt der Greifvorgang durch Quetschung und auftretende Scherkräfte ein hohes Risiko für den Menschen (ISO/TS 15066, 2016).

Die Geometrie des Greifers an einem Roboterarm hat einen großen Einfluss auf den Gesamteindruck der Roboterapplikation (ISO/TS 15066, 2016, S. 4) und ihr Gefährdungspotential. Ein kantenfreier Greifer mit abgesichertem Greiferwerkzeug, der vielfältige Verletzungsrisiken ausschließt, kann einen positiven Eindruck und daher größere Sicherheit vermitteln (Wagner, 2018, S. 4).

Besonders hilfreich für die Gesamtsicherheit des Systems ist ein Greifsystem, welches mögliche Gefahrstellen an einem Werkstück abschirmt.

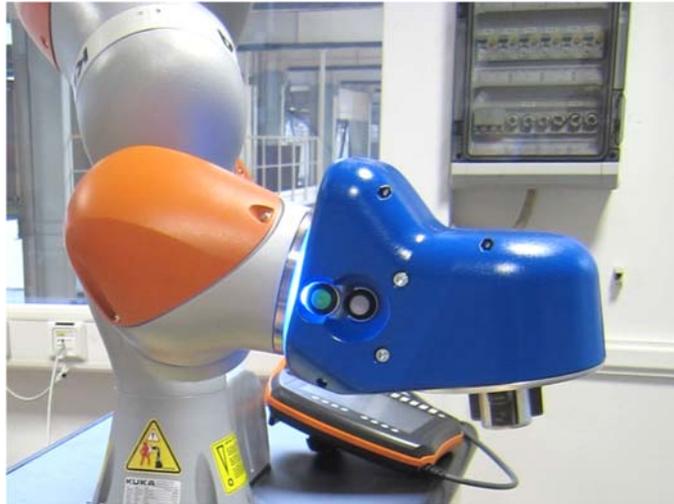


Abbildung 18: MRK tauglicher Greifer für Getrieberäder

Das in Abbildung 18 dargestellte Greifsystem ermöglicht ein Verdecken eines Getrieberades nach oben, sodass bei entsprechender Roboterbahnplanung eine Kollision nur mit dem abgerundeten Greifergehäuse und nicht mit spitzen Kanten des Werkstücks stattfinden kann.

Diesen individuell ausgelegten Greifern für die MRK stehen Forderungen der Industrie gegenüber, den Greifer eines Roboters universal für unterschiedliche Anwendungen einsetzbar zu machen, wie beispielsweise verschieden geformten Getriebeteilen (Sonnenberg, 2017). Zukünftige Greifer sollen weiterhin intelligent ausgestattet sein und Daten wie Gewicht, Temperatur, Dimension des Werkstücks sowie Impedanz oder Strom an den Roboter übertragen (Paeschel, 2018, S. 52).

Ergänzend wird künftig auch die Schnittstelle zum Menschen größere Bedeutung erlangen, wie durch einen Bildschirm als MMI, siehe Abbildung 19 (Müller, 2019, S. 65).



*Abbildung 19: Greifer mit Bildschirm als Informationsschnittstelle
(Co-act JL1 der Firma Schunk)*

Sicherheit

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften definiert zwei Aspekte der Sicherheit: Safety und Security (Kagermann et al., 2013, S. 10; DGUV, 2016, S. 2).

Als „Safety“ wird definiert, dass von dem Roboter keine Gefährdungen für Mensch und Umgebung ausgehen dürfen. Die „Security“ hingegen beschreibt den Schutz des gesamten Systems vor Missbrauch und unbefugtem Zugriff (Jopp, 2015, S. 19; Kagermann et al., 2013, S. 10).

Die Mensch-Roboter-Kooperation unterliegt diversen Normen wie der DIN EN ISO 10218 und der ISO/TS 15066, nach denen ein MRK-Arbeitsplatz ausgelegt werden muss. Für das neue Feld der Mensch-Roboter-Interaktion wurden und werden viele Normen aktualisiert und angepasst.

In vorangegangenen Normen, wie der nicht mehr gültigen Norm EN 10218:2011 wurden die erlaubte Kontaktkraft zwischen einem Roboter und einem Menschen auf 150 N für Arm, Hand und Unterschenkel festgelegt, sofern keine scharfen Kanten vorhanden sind und sich der Druck gleichmäßig verteilt. Für das Gesicht lag die Grenze bei 65 N und am Kehlkopf bei 35 N (Strassmann, 2012). Als Orientierungshilfe dienten bekannte Grenzwerte, wie sie für Quetschkräfte an Türen und Toren sowie Aufzugs- und Bustüren

gelten (DIN EN 12453, 2014)⁷. Die ISO/TS 15066 liefert aufgrund von Probandenversuchen deutlich genauere Werte (Kraft und Druck), die den Schmerzeintritt an 36 verschiedenen Körperregionen aufzeigt (ISO/TS 15066, 2016). Beispielhaft sei an dieser Stelle erwähnt, dass der maximal zulässige Druck im Bereich der Hand an der Zeigefingerkuppe mit 300 N/cm² und einer Kraft von 140 N wirken darf (ISO/TS 15066, 2016, S. 33).

Derzeit stellen schlecht kalkulierbare Ereignisse wie das reflexartige Verhalten des Menschen (Vetter, 2014, S. 124) und der Zutritt einer zusätzlicher Person die größten Risikofaktoren dar.

Im Rahmen des Forschungsprojektes *Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains* (PHRIDOM) wird die sicherheitsgerichtete Technik aktueller Robotermodelle grundlegend hinterfragt. Die Anforderungen an Kontrolltechniken in der Mensch-Roboter-Interaktion sollen vollkommen neue Sicherheitstechniken nötig machen (Albu-Schäffer, 2005, S. 2) und können auch aus einer Kombination verschiedener Sensoren (Behnke, 2013, S. 236), beispielweise für den Nah- und Fernbereich oder auch persönlichen Schutz-einrichtungen bestehen (Vetter, 2014, S. 124; Kistner et al., 2018, S. 7, 13).

Eine mögliche Realisierung ist das Highlight des Forschungsprojektes *Rosetta*, das die dynamische Erfassung eines bewegten Objektes in seiner Umgebung erlaubt. Entsprechend des Gefährdungspotentials für einen Menschen in der direkten Umgebung des Roboters, ändert dieser seine Bewegungen (Rosetta, 2013; Matthias, 2011, S. 25).

Das Forschungsprojekt *Effiziente und sichere Interaktion von Menschen und intelligenten Produktionsanlagen* (EsIMiP) sieht die Nutzung sicherer Ultraschallsensoren vor, die am Roboterarm befestigt werden und dadurch den Abstand des Roboters zur direkten Umgebung messen (Ostermann, 2014, S. 60).

In diversen Forschungseinrichtungen wird aktuell die Erfassung einer Roboterumgebung mittels optischer Sensorik verfolgt (vgl. Koch, 2002, S. 49; Fernández, 2016, S. 14;

⁷ Die Geschwindigkeit des sich schließenden Spaltes einer Tors darf 0,5 m/s nicht überschreiten (DIN EN 12453, 2014, S. 15). Der dynamische Stoß darf 400 – 1400 N, abhängig von der Art des Tores, betragen. Die statische Kraft darf für 5 Sek. 150 N, danach nur noch 25 N oder max. 50 N betragen (DIN EN 12453, 2014, S. 30). Unter bestimmten Bedingungen werden sogar weitere Kraftspitzen akzeptiert (DIN EN 12453, 2014, S. 30).

Taylor et al., 2012, S. 7; Behnke, 2013, S. 236; Ostermann, 2014, S. 135; Winkler, 2008, S. 2; Henrich et al., 2008, S. 9).

Die Aspekte der Sicherheit von MRK-Robotern werden aufgrund ihrer Ausgiebigkeit an dieser Stelle nur angerissen sein und nicht weiter vertieft.

Intelligente Mensch-Roboter-Kooperation

Unter dem Aspekt der intelligenten MRK soll die Anpassung des Bewegungsmusters und der Bahnplanung (Zurückweichen / kontaktfreies Stehenbleiben) verstanden werden. „Ein intelligenter industrieller Roboter berührt den Menschen nicht und verhält sich stets defensiv“ (Braune, 2015, S. 18). Bereits im Jahr 2004 (Fraunhofer, S. 7) wurde die Forschung für eine „zuverlässige Vermeidung von Kollisionen“ aufgenommen. Dies erwirkte bedeutende Effekte auf dem Arbeitsmarkt (Rüdiger, 2017, S. 18).

Über eine Gesten- und Bewegungserkennung (vgl. Zhao et al., 2013, S. 321) können zukünftig beispielsweise hektische Bewegungen, die auf ein hohes Stresslevel schließen lassen, Einfluss auf die Roboterbewegung nehmen. Die TU Berlin forscht seit dem Jahr 2014 im interdisziplinären Forschungsprojekt *Physical Exploration Challenge* an der Intelligenz von Robotersystemen. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Informationsaneignung gelegt, die zukünftig autonom durch den Roboter erfolgen soll (DFG, 2017).

Zusammenfassung der Charakteristiken der Arbeitsumgebung

Der gemeinsame Arbeitsraum von Mensch und Roboter wird grundlegend durch den Roboter manipulator und sein Bewegungsverhalten definiert, vor allem durch die Richtung der Bewegung des Roboters.

Daneben zeigt sich die Auslegung der Arbeitsraumgeometrie mit besonderem Einfluss auf die beiden Interaktionspartner. Gute Gestaltungsgrößen sind in diesem Zusammenhang die Entfernung und der Winkel, in dem Mensch und Roboter zueinander stehen.

Diesen drei Charakteristiken ist gemein, dass sie von einem interagierenden Menschen über den Sehsinn wahrgenommen werden, weshalb dieser sich als Erfassungsmethode gut eignet. In dem folgenden Hauptkapitel wird dementsprechend die Methode des Eye-

Trackings als Erfassungsmöglichkeit für Blickbewegungen vorgestellt. Die drei Charakteristiken sollen in den darauffolgenden Versuchen genauer beleuchtet werden, wodurch ihre Bedeutsamkeit für die Auslegung einer Mensch-Roboter-Kooperation (wissenschaftliche Fragestellung) nachgewiesen werden soll.

Als Vorbereitung für die Versuche ist eine weitere Charakteristik von Bedeutung: die Arbeitsplatzgestaltung. Diese soll aufzeigen, in welcher Form Mensch und Roboter miteinander interagieren können und dürfen. Das nachfolgende Kapitel zeigt daher die unterschiedlichen Formen der Mensch-Roboter-Interaktion.

2.3.4 Charakteristiken der Arbeitsplatzgestaltung

Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung eines Arbeitsplatzes ist es nicht ausreichend, nur die technische Eignung des Roboters für einen Arbeitsplatz zu prüfen: sämtliche beschriebenen Charakteristiken einer MRK-Applikation sind im Planungsprozess zu berücksichtigen. Entsprechend ihrer Zusammensetzung können diese Charakteristiken verschiedene Formen der Mensch-Roboter-Kooperation ermöglichen, die sich durch unterschiedliche Intensitäten der Zusammenarbeit auszeichnen. Verschiedene dieser Szenarien werden in diesem Abschnitt erläutert.

Neben der geringeren Belastung des Menschen durch Abgabe von weniger ergonomischen Teilaufgaben an den Roboter, müssen auch neu auftretende Einflüsse in der veränderten Arbeitsplatzumgebung, beispielsweise ein höherer Qualifizierungsbedarf der betroffenen Mitarbeiter, berücksichtigt werden. Bei der Auslegung eines MRK-Arbeitsplatzes ist zu fokussieren, keine zusätzlichen Belastungen für den Mitarbeiter zu schaffen. Die nachfolgende Einordnung der Charakteristiken eines Arbeitsplatzes soll dazu dienen, die möglichen Einflussgrößen, die zu einer Belastung des Mitarbeiters führen können, zu gliedern und in den anschließenden Versuchen zu untersuchen und zu bewerten.

Für die Gestaltung eines Arbeitsplatzes, in den ein Roboter integriert werden soll, sind diverse Charakteristiken zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 2.3). Die entsprechenden Systemeinstellungen und zusätzlichen Komponenten sind in unterschiedlicher Komplexität und Preiskategorie erhältlich. Eine sinnvolle Auslegung dieser Parameter ist zu Beginn der Planungstätigkeit somit unerlässlich.

Hierfür ist zunächst die Bestimmung des MRK-Levels erforderlich. Dieser Grad der Zusammenarbeit bestimmt maßgeblich die Sensitivität und Akribie, mit der der Arbeitsplatz auszulegen ist. Um diese Bestimmung zu erleichtern, wurde eine Matrix des Fraunhofer IFF (Behrens & Elkmann, 2016, S. 5) als Entscheidungsbaum zur Bestimmung des MRK-Levels erweitert (Naar & Fischer, 2016, S. 14). Die Bestimmung des MRK-Levels (Abbildung 20) beginnt mit der Abfrage, ob ein gemeinsamer Arbeitsraum, zeitgleiches Arbeiten oder eine direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter vorliegen. Für die zeitliche und räumliche Beurteilung wird zudem die Möglichkeit der Absicherung durch einen Schutzzaun geprüft. Auf Basis dieser vier Abfragen wird die Interaktion zwischen Mensch und Roboter in die Ebenen 0 - klassische Robotik bis 5 - direkte MRK eingeteilt.

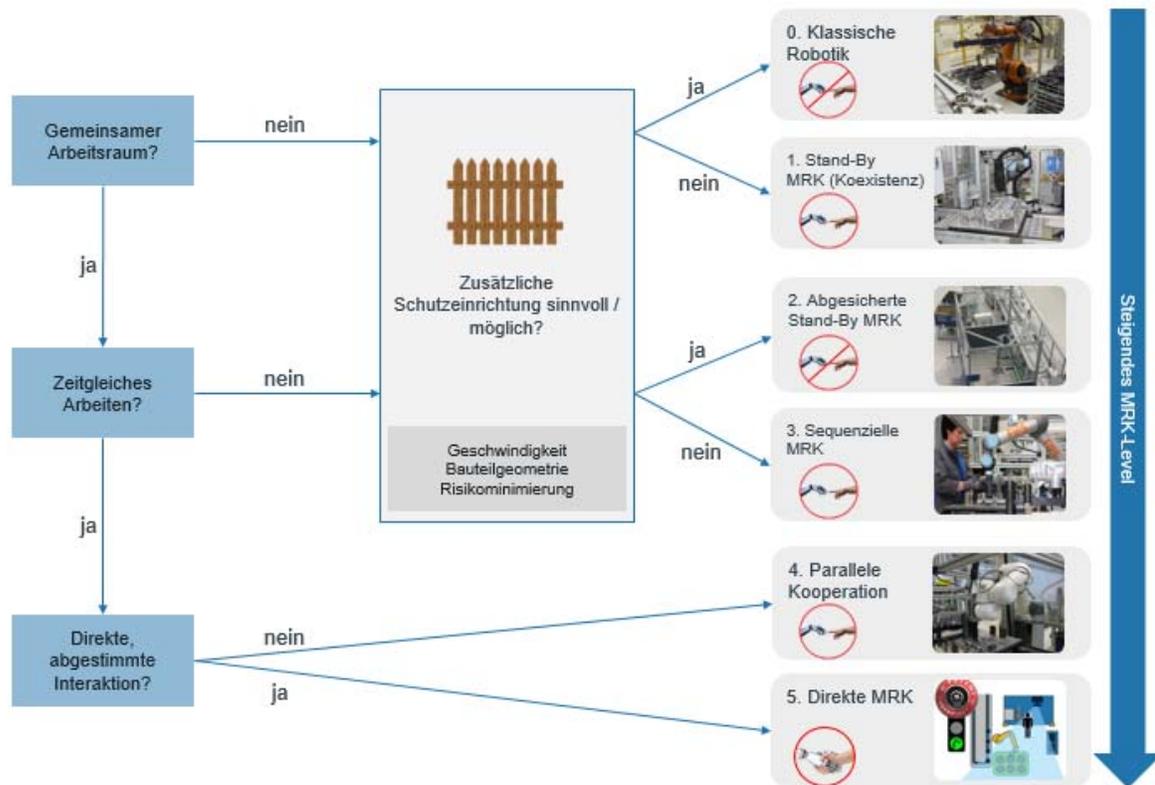


Abbildung 20: Klassifikation des MRK-Levels
(in Anlehnung an Behrens & Elkmann, 2016, S. 5; Thiemermann, 2005, S. 43)

Die „klassische Robotik“ entspricht dabei dem MRK-Level 0. Dies ist die konventionelle Automatisierung mit Industrierobotern, die durch einen Schutzzaun vom Menschen

getrennt sind. Diese Form der Robotik ist für kurze Taktzeiten, scharfkantige oder schwere Bauteile sinnvoll einsetzbar.

In der „Koexistenz“ oder „Stand-By MRK“ teilen sich Mensch und Roboter noch keinen gemeinsamen Arbeitsraum. Dennoch wird in dieser Kooperationsform gerne auf einen Schutzzaun verzichtet, um beispielsweise geringen Platzverhältnissen zu begegnen.

Im regulären Arbeitsablauf besteht dabei kein Kontakt zwischen Mensch und Roboter, sie sind prinzipiell räumlich getrennt. Erst für eine Prozesskontrolle, Bauteilprüfung oder Ähnliches tritt der Mensch bewusst in den Arbeitsraum des Roboters ein, ohne die Tätigkeiten des Roboters zu unterbrechen. Die direkte Interaktion und ein möglicher Kontakt entstehen somit bewusst und von dem Menschen eingeleitet.

Grundlage dieses Konzepts ist die Annahme, dass die direkte Mensch-Roboter-Interaktion zu einer großen kognitiven Beanspruchung des Menschen führt, was zu einer deutlich verminderten Arbeitsleistung führt. Die Trennung von Mensch und Roboter soll die Aufmerksamkeit des Menschen auf seiner Tätigkeit belassen.

Zur Realisierung eines solchen Konzeptes muss ein Mindestabstand zwischen den Hauptarbeitsbereichen von Mensch und Roboter eingehalten werden und die Möglichkeiten der Interaktion, d. h. des Kontaktes, klar definiert sein. Während des gesamten Prozesses muss die Systemkontrolle dem Menschen obliegen und die Bewegung des Roboters für ihn vorhersehbar sein (Braune, 2015, S. 13). Der Roboter nimmt dabei eine defensive, dienende Haltung ein (Braune, 2015, S. 17).

In diesem Konzept können MRK-fähige Robotermodelle eingesetzt werden, die eine eher geringere Sensitivität aufweisen, wie sie beispielsweise durch die Motorstromüberwachung erreicht wird.

Im Vergleich zu konventionellen Roboterzellen ist im schutzzaunlosen Betrieb bei menschlichem Fehlverhalten, wie dem unbeabsichtigtem Betreten des Roboterarbeitsraums oder einem technischen Fehler, ein Kontakt möglich.

Die gleichen Annahmen gelten für die „abgesicherte Stand-By MRK“, wobei der Roboter von einem Sicherheitszaun umgeben ist. Dies ist erforderlich, wenn sich das Bauteil nicht für den schutzzaunlosen Betrieb eignet. Insofern sich der Mitarbeiter regelmäßig in den

Arbeitsraum des Roboters begeben muss, erleichtern berührungslos wirkende Schutzvorrichtungen, wie eine Lichtschranke, das Betreten der Roboterzelle.

Bei der „sequentiellen Kooperation“ befinden sich Mensch und Roboter nicht zur gleichen Zeit im kooperativen Arbeitsraum, jedoch liegen ihre eigentlichen Arbeitsbereiche sehr dicht nebeneinander. In dieser Form der MRK kann es bereits zu regelmäßigen Kontakten zwischen den Kooperationspartnern kommen, diese sind dann jedoch ungewollt, d. h. für den Arbeitsablauf nicht erforderlich.

In der „parallelen Kooperation“ besteht bereits eine enge räumliche Verbindung zwischen Mensch und Roboter. Ein Beispiel hierfür kann das Anreichen eines Bauteils oder das gleichzeitige Durchführen von Tätigkeiten an einem Werkstück sein.

Mensch und Roboter haben einen zu einem eher geringen Anteil sich überschneidenden Arbeitsraum, den sie in ihren entkoppelten Arbeitsabläufen gleichzeitig betreten können. Für die Erfüllung der Arbeitsaufgaben ist es nicht erforderlich und sinnvoll, dass sich die Bewegungsbahnen der Kooperationspartner im regulären Ablauf kreuzen.

Umso höher der Anteil ist, in dem sich Mensch und Roboter gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum bewegen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines Kontaktes. Im Vergleich zu den vorherigen Konzepten besteht bei einer parallelen Kooperation ein erhöhtes Risiko eines unbewusst entstehenden Kontakts. Dadurch unterliegt der Mensch wahrscheinlich einer größeren Belastung. Der Kontakt in diesem Konzept ist ungewollt, da er zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe nicht erforderlich ist. Bei einer solchen Arbeitsplatzauslegung ist anzunehmen, dass der Mensch die Bahnplanung des Roboters verinnerlicht und sich dieser anpasst, um einem ungewollten Kontakt zu entgehen; der Mensch ordnet sich dem Roboter unter.

Für dieses Arbeitsplatzkonzept ist ein deutlich sensitiverer Roboter auszuwählen als in den vorherigen Konzepten.

Die „direkte MRK“ stellt die intensivste Zusammenarbeit von Mensch und Roboter dar und entspricht dem höchsten MRK-Level. Bei dieser direkten Form der Zusammenarbeit ist der Roboter befähigt, auf die Aktivität des Menschen zu reagieren. Der Roboter synchronisiert sich mit dem Menschen, um ihm im Fall einer drohenden ungewollten Kollision auszuweichen. In engen gemeinsamen Arbeitsräumen oder bei taktbedingten

Anpassungen des Roboters an den Menschen ist der Einsatz eines intelligenten Roboters sinnvoll. Diese lernende und intelligente Form der MRK befindet sich zurzeit im Forschungsstadium (siehe Abschnitt 4.3.6; Koczula, 2018, S. 42).

Zusammenfassung der Charakteristiken der Arbeitsplatzgestaltung

Sowie die Literatur also auch die Normung und die Technik lassen eine Vielzahl verschiedener Formen der Mensch-Roboter-Kooperation zu. Sechs prägnante Formen der MRK werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

Insbesondere die höher nummerierten Formen der Zusammenarbeit sind bisher nur in geringer Anzahl industriell eingesetzt und wenig erforscht. An diesem Punkt sollen die praktischen Untersuchungen in dieser Arbeit weitere Erkenntnisse liefern.

Die Priorisierung der besonders relevanten Charakteristiken und eine Auswahl für die praktischen Versuche findet in Abschnitt 4 statt.

2.3.5 Zusammenfassung der Charakteristiken

Dieses Kapitel stellt eine Vielzahl von Charakteristiken vor, die eine Zusammenarbeit von Mensch und Roboter definieren. Die beiden Teilnehmer einer MRK, der Mensch und der Roboter werden anhand ihrer Eigenschaften und Fähigkeiten vorgestellt.

Für die Zielsetzung dieser Arbeit, Formen der Mensch-Roboter-Kooperation zu beschreiben, die möglichst angenehm auf den Menschen wirken, soll insbesondere die Aufmerksamkeit, bzw. die entsprechende Ablenkung betrachtet werden. Das nachfolgende Kapitel stellt entsprechende Methoden vor, welche die Ablenkung mittels Blickverhalten erklärt. Ein Aspekt der spontanen Ablenkung, das Erschrecken soll ebenfalls mittels Blickverhalten, genauer mittels Pupillenreaktionen beschrieben werden. Der kognitive Verarbeitungszyklus soll als Möglichkeit dienen, die aufgezeigten Zusammenhänge zu erklären.

Dieses Kapitel zeigt daraufhin in den Charakteristiken der Arbeitsumgebung diverse Einstellparameter, die als Einflussfaktoren auf die Form der Interaktion von Mensch und Roboter wirken. Die Arbeitsplatzgestaltung zeigt weiter, zu welchen Konstellationen der Zusammenarbeit diese verschiedenen Intensitäten führen.

Insbesondere die engeren Formen der Zusammenarbeit, in denen Mensch und Roboter nah beieinander stehen oder sich sogar ablaufbedingt berühren, sind heute nur in geringer Form wissenschaftlich aufgearbeitet. Hierfür stellt das folgende Kapitel Methoden vor, die eine Mensch-Roboter-Kooperation detailliert betrachten und neue Erkenntnisse liefern.

3 Methoden

Die später folgenden Versuche sollen die Beanspruchung eines Menschen betrachten, der mit einem Roboter interagiert. Die am häufigsten angewandten Methoden zur Messung der Beanspruchung sind die Pulsfrequenz, die elektrische Muskelaktivität und die subjektive Einschätzung, bekanntermaßen durch einen Fragebogen und das Blickverhalten.

Die Pulsfrequenzmessung eignet sich insbesondere für Untersuchungen, bei denen der Proband einer hohen physischen oder psychischen Belastung ausgesetzt ist. Die Messung der elektrischen Muskelaktivität sollte grundsätzlich nur für vergleichende Messungen verwendet werden. Das Elektroenzephalogramm (EEG) ermöglicht die Aufnahme von elektrischen Aktivitätsmustern des Gehirns durch oberflächlich am Schädel angebrachte Elektroden. Die Aufnahmen beruhen auf der Ablenkung elektrischer Feldlinien im Extrazellularraum, die durch synaptische Aktivität entstehen. Besonders vorteilhaft bei dieser Art von Messung ist die hohe zeitliche Auflösung, die jedoch einer geringen räumlichen Auflösung gegenüber steht (Pape, 2005, S. 831).

Die physiologischen Indikatoren bieten im Allgemeinen nur wenig valide Ergebnisse (Pfendler, 1990, S. 159), weshalb sie in dieser Arbeit nur am Rande behandelt und maximal als Vergleichsindikator herangezogen werden sollen.

Als Beanspruchungsindikatoren lassen sich weiterhin die Augenbewegung und Lidschlagfrequenz, sowie der Pupillendurchmesser verwenden (Pfendler, 1990, S. 159; Lysaght et al., 1989, S. 144). In dieser Auswahl stellt jedoch nur die Augenbewegung ein „exzellentes“ physiologisches Beanspruchungsverfahren dar (Lysaght et al., 1989, S. 145).

Das vorhergehende Kapitel stellt diverse Charakteristiken vor, die den Menschen, den Roboter sowie ihre gemeinsame Arbeitsumgebung beschreiben. Viele dieser Charakteristiken weisen die visuelle Komponente des Menschen als elementares Bindeglied zum Roboter und zur Arbeitsumgebung aus. Daher soll der optische Wahrnehmungskanal des Menschen als Grundlage für die geplanten Versuchsdurchführungen dienen. Die Wahrnehmung soll in Form der visuellen Ablenkung und des Erschreckens erfasst werden.

Eine erprobte Technik der objektiven Ermittlung von Blickbewegungsdaten stellen die Methoden des Eye-Trackings dar, die innerhalb dieses Kapitels vorgestellt werden. Diese Methode ermöglicht die Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Blickbewegung und der Ablenkung, bzw. Aufmerksamkeit. Detailliert wird hierfür auch auf die zugrundeliegenden medizinischen Zusammenhänge im menschlichen Auge eingegangen. Die Hintergründe dieser Zusammenhänge zeigen die neuronale Verschaltung und die kognitive Informationsverarbeitung, siehe Kapitel 2.3.2.

Die objektive Erfassung mittels Eye-Tracking soll durch einen Fragebogen ergänzt werden, welcher die subjektiven Einstellungen und die wahrgenommene Beanspruchung der Probanden in den Versuchen aufnimmt.

Die somit zweikanalig, subjektiv und objektiv, erfassten Daten sollen aufzeigen, in welcher Form die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter ergonomisch und mit geringer Beanspruchung für den Menschen gestaltet sein kann. Diese Ergebnisse sollen die Basis für die Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellungen sein.

3.1 Eye-Tracking – Blickbewegungsanalyse

Im Bereich des Eye-Trackings werden drei unterschiedliche Messstrukturen unterschieden: Die Bewegung des Auges durch die drei verschieden angeordneten Muskelpaare, die autonom kontrollierte Pupille und das Lidschlussverhalten (Lysaght et al., 1989, S. 144). Die Betrachtung der reinen Augenbewegung stellt die wichtigste und aussagekräftigste Untersuchungsmethode dar (Lysaght et al., 1989, S. 146). Trotz der hervorragenden Bewertung des Analyseverfahrens besteht die Möglichkeit von Fehleinschätzungen. Einen potentiellen Einfluss auf die Messungen in dieser Arbeit kann die Lichtintensität ausüben. Dies bedeutet, dass sich eine veränderte Augenbewegung diagnostizieren lässt, die Ursache jedoch entweder eine erhöhte Beanspruchung oder schwankende Lichtverhältnisse in der industriellen Umgebung sind (Lysaght et al., 1989, S. 145).

Die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Zusammenhänge zwischen Blickbewegung und Informationsverarbeitung sollen für die Aufnahme der Reaktionen des Menschen verwendet werden. Dazu wird das Verfahren der Blickbewegungsanalyse angewandt.

Bei der Methode des Eye-Trackings handelt es sich um eine objektive Messmethode, wie von Dörr (2015, S. 138) nachgewiesen.

Bei dieser Methode werden zwei Kamerasysteme eingesetzt, welche die Umgebung des Probanden und eines oder beide Augen filmen. Hierbei eignen sich Systeme in Form einer Brille besonders gut. Durch eine spezielle Software werden die Bilddaten der Augen- und Umfeld-Kameras übereinander gelegt und miteinander verrechnet. Daraus lässt sich Bildmaterial generieren, das den Blick des Probanden in der aufgenommenen Umgebung darstellt.

Das Umgebungsbild kann zur Analyse in verschiedene Bereiche, den Areas of Interest (AOIs) unterteilt werden. Besonders geschickt lässt sich dies mittels „Marker Tracking“ realisieren. Diese Marker⁸ können an bestimmten AOIs platziert werden, beispielsweise dem direkten Blickfeld des Arbeitsbereichs und einem Roboter. In der Umgebungs-darstellung lassen sich die Areas of Interest den Markern zuordnen, wodurch eine dynamische Verknüpfung der digitalen Areas im Bild möglich wird. Die verwendete Software ist auf dieser Basis in der Lage, die Blickzuordnung der einzelnen Areas of Interest zu errechnen.

Das Messverfahren unterliegt einigen Einschränkungen. Beispielsweise sollte einer möglichen Ungenauigkeit in den Aufzeichnungen durch eine ausführliche Kalibrierung vorgebeugt werden.

Das Eye-Tracking System besteht aus einer Brille, die mit flexibel einstellbaren Kameras ausgestattet ist. Das System ermöglicht das Erfassen und Aufzeichnen von Augenbewegungen und Veränderungen der Pupillengröße. Die Kamera wird durch Kabel oder Funk mit einem Empfangsgerät verknüpft, das wiederum an einen Computer angeschlossen wird (Ergoneers, 2011; Ergoneers, 2019).

Die Eye-Tracking Brille besteht aus einem Gestell mit mehreren Kameras. Je eine Kamera pro Auge (Detect eye0, Detect eye1) und eine mittig angebrachte Field

⁸ Die Verwendung von Markern mit fünf mal fünf Punkten erlaubt insgesamt 64 verschiedene Marker, welche die Auswertung von Fixationen auf bestimmten, den Markern zugeordneten Areas of Interest (AOIs) automatisiert. Die einzelnen Marker können definierten AOIs über mehrere Versuche und Programmstarts zugeordnet werden, wenn sie in der Datenbank des Pupil Capture registriert sind (Pupil Labs, 2016c).

Cam (World Camera) nimmt den Blickbereich, das Field of View (FOV) auf. Das System wird mittels USB-Kabel an einen Computer mit Linux-Betriebssystem angeschlossen. Das Hauptprogramm der Pupil Labs Software ist die Pupil Capture App.

Der Vorgang des Einrichtens beginnt mit der Prüfung der beiden Eye-Kameras. Das Auge muss gut sichtbar sein, wofür die Kamera an der Brille feinjustiert werden kann, um einen optimalen Blickwinkel auf die Pupille zu ermöglichen.

Danach wird die Kalibrierung im Hauptmenü aufgerufen. Für eine schnelle Kalibrierung im Nahbereich eignet sich die „Screen Marker Calibration“. Bei dieser Kalibriervariante werden an verschiedenen Positionen auf einem Bildschirm Kalibrierungspunkte angezeigt, die bei möglichst konstanter Kopfhaltung über die Augenbewegung verfolgt werden. Nachdem der erfolgreiche Kalibriervorgang bestätigt wurde, erscheint im „World-Fenster“ des Hauptmenüs ein roter Punkt, der die Blickbewegung in annähernder Echtzeit anzeigt. Über den Button „record“ kann nun die Bildaufnahme gestartet werden.

Mit einem per Funk verbundenen Monitor lässt sich die korrekte Aufnahme während des Versuchs überprüfen. Die kabellose Verfolgung des Versuchs fördert eine freiere und natürlichere Verhaltensweise der Probanden.

Während der Aufnahme werden World- und Eye-Videos sowie sämtliche, dem Blick zugehörige Daten, die sogenannten „gaze data“ in einem automatisch angelegten Ordner gespeichert. Diese Daten in Tabellenform können beispielsweise mit Excel geöffnet und analysiert werden. Die Video-Dateien werden mittels Pupil Player angezeigt. Über den Export der Videoinhalte werden die Inhalte in Tabellenform abgespeichert (Pupil Labs, 2016a).

Die integrierten Kameras zeichnen sowohl für den Menschen sichtbares Licht sowie Infrarotes Licht (IR) auf. Spezielle IR-Filter und starke IR-LEDs können Reflexionen von sichtbarem Licht überlagern und eine gute Bildqualität erzeugen. Die besten Ergebnisse werden unter Ausschluss von direktem Sonnenlicht bei einer Beleuchtung mit LEDs, Neonlicht oder fluoreszierendem Licht erreicht (Pupil Labs, 2016b).

3.1.1 Das menschliche Auge

Die vorgestellten Methoden des Eye-Trackings basieren auf der Erfassung der Funktionalitäten des menschlichen Auges. Dieses Unterkapitel stellt daher die Funktionsprinzipien, den Aufbau und die Verhaltensweisen des menschlichen Auges dar, dies als Basis für die späteren Versuchsauswertungen verwandt werden sollen.

Aufbau, Funktion und Bewegung des Auges

Im menschlichen Auge (Abbildung 21) entstehen Bilder der Umgebung, indem durch die Pupille eintretende Lichtstrahlen gebrochen und auf der Netzhaut abgebildet werden. Auf der Netzhaut, im Zentrum des Gelben Flecks befindet sich die Fovea: der Ort des schärfsten Sehens.

Die Brechung des Lichts findet hauptsächlich in der Hornhaut statt. Die Linse ermöglicht durch Veränderungen ihrer Krümmung die Scharfstellung auf Objekte in verschiedenen Entfernungen. Als variable Blende passt sich die Pupille dem Lichteinfall an. Die Umsetzung des optischen Reizes in Erregung neuronaler Elemente findet in der Netzhaut statt (Eysel, 2005, S. 686).

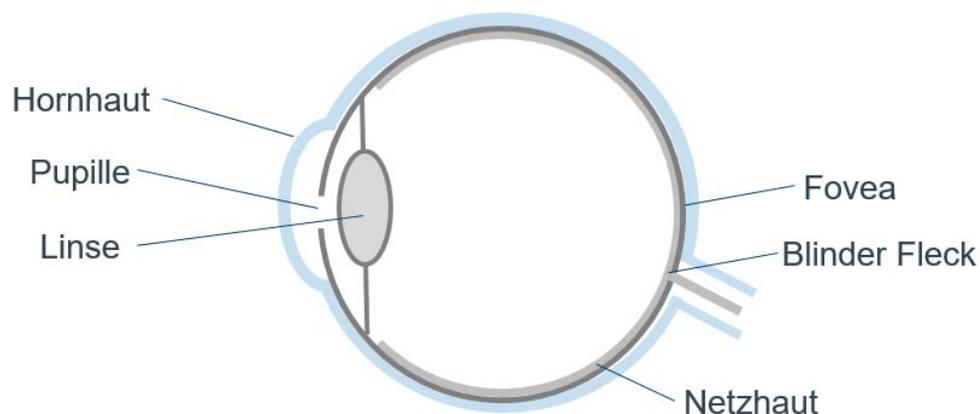


Abbildung 21: Horizontalabschnitt durch das menschliche Auge
(Pfeiffer, 2019; Mißfeldt, 2018)

Abbildung 22 zeigt, dass das Auge durch sechs feine Muskeln in drei Achsen bewegt wird: der Horizontal-, der Vertikal- und der Torsionsachse. Die Steuerung dieser Augenbewegung findet auf verschiedenen zerebralen, d. h. das Gehirn betreffenden Ebenen statt (Bruggencate & Dieringer, 2005, S. 774).

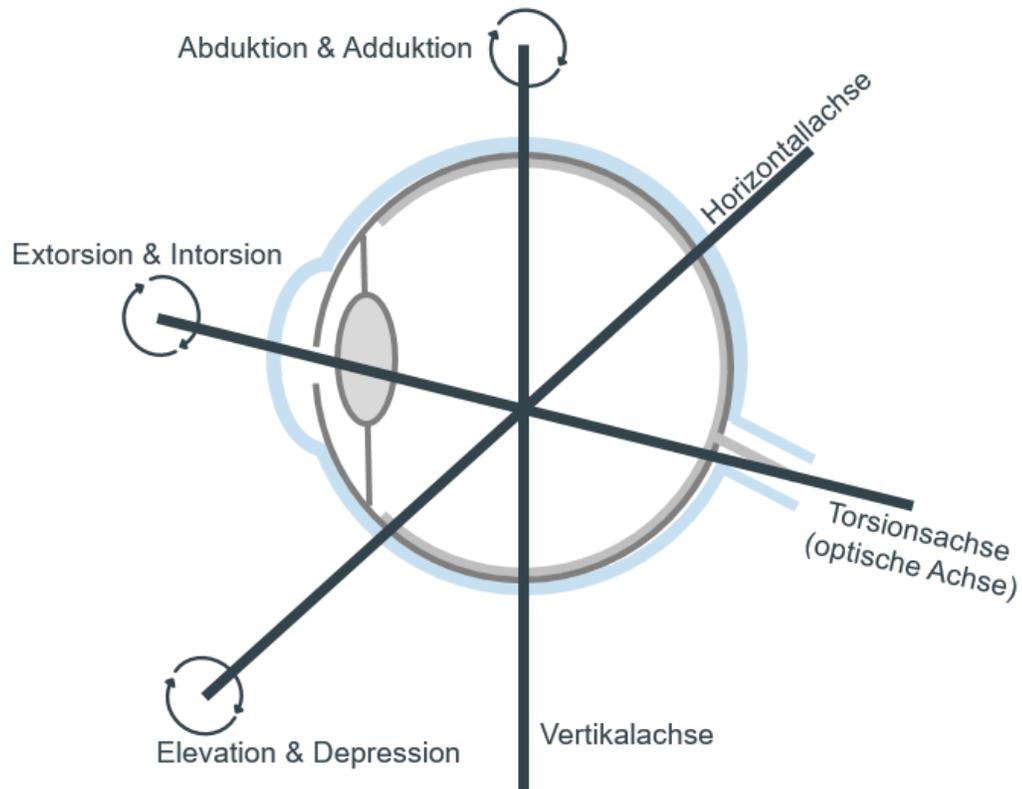


Abbildung 22: Okulomotorik
(vgl. Bruggencate & Dieringer, 2005, S. 775)

Die Bewegungen des Auges läuft nach vier verschiedenen Formen ab.

Die kompensatorischen Augenbewegungen ermöglichen auch bei Bewegung auf unwillkürlicher Ebene (1; vestibuläre und visuelle Reflexe) eine kontinuierliche visuelle Darstellung bei Fixation eines Objektes. Diese Ausgleichsmechanismen bestehen nicht nur bei Kopfdrehung, sondern auch bei Fixation während einer Bewegung, wie beispielsweise beim Aus dem Fenster schauen während einer Zugfahrt.

Durch motorische Programme wird die Fovea schnellstmöglich auf den Fixationspunkt gelegt. Ein solcher Blicksprung mit permanentem Wechsel des Fixationspunktes wird als Sakkade bezeichnet. Durch die motorischen Programme kann alternativ ein bewegtes Objekt verfolgt werden. Diese Zielverfolgung, die aus Sakkaden und der Augenfolgebewegung besteht, wird Nystagmus genannt (Bruggencate; Dieringer, 2005, S. 775).

Diese Kompensationsbewegung des Auges ist der Bewegung des Kopfes entgegengerichtet und wird reflexartig (vestibuläre und optokinetische Reflexe), mit einer

Latenz von ca. 15 ms durch Dreh-, bzw. Linearbeschleunigungen des Kopfes ausgelöst (Bruggencate; Dieringer, 2005, S. 776).

Der Zusammenhang zwischen der Augen- und Kopfbewegung wird in Abbildung 23 visualisiert.

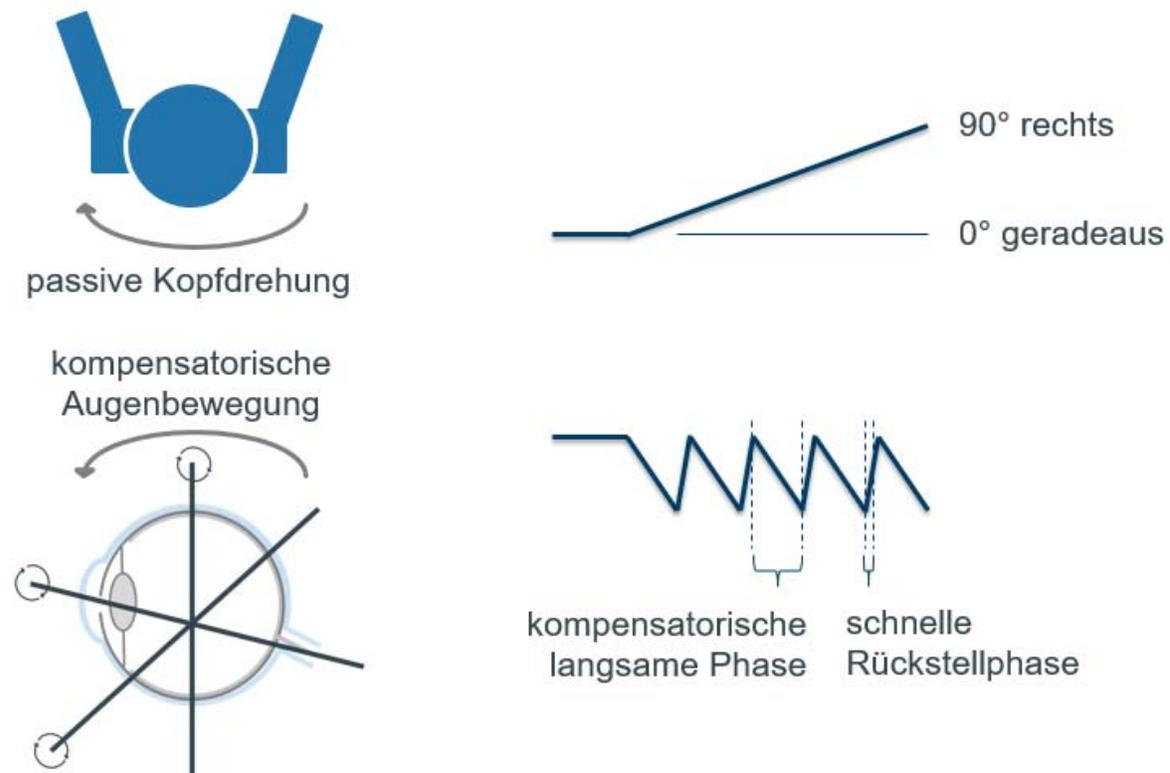


Abbildung 23: Zusammenhang von Augen- und Kopfdrehung
(nach Bruggencate & Dieringer, 2005, S. 776)

Die Sakkade dient der ruckartigen Erfassung visueller Ziele (2). Ein solcher Blickwechsel lenkt das Blickfeld ruckartig auf ein neues Objekt. Während dieser kurzen Bewegung, der sogenannten sakkadischen Suppression (30-70 ms Dauer) ist die visuelle Bewegungswahrnehmung eingeschränkt: Die Wahrnehmung reduziert sich auf die Zeiten der Fixation, während der Bildverschiebung ist keine Wahrnehmung möglich (Bruggencate & Dieringer, 2005, S. 778). Diese Sakkaden werden reflektorisch oder willkürlich ausgelöst.

Die reflektorische Augenbewegung wird durch plötzlich auftauchende, bewegte Objekte in der Peripherie ausgelöst. Eine solche reflexartige Fokussierung des Auges auf ein

Objekt wird als „visueller Greifreflex“ bezeichnet. Neben peripheren Bewegungen wird dieser Reflex auch durch plötzliche Geräusche und Berührungen ausgelöst.

Eine willkürliche Sakkade dient der Exploration der Umgebung oder eines Objekts, wobei die Fovea auf markante Stellen gelenkt wird. In dieser Phase (1 s mit ca. 3 Sakkaden zzgl. 20 ms Fixationszeit) werden reflektorische Sakkaden unterdrückt (Bruggencate & Dieringer, 2005, S. 779). Die Dauer einer Sakkade liegt zu ca. 80% bei mindestens 300 ms und zu 3-4% unter 100 ms (Gleser & Leuschina, 1979, S. 61).

Die ruckfreie Verfolgung bewegter Ziele, die sogenannte Zielfolgebewegungen (3) basiert auf einer kortikalen Steuerung und nicht auf Reflexen (Bruggencate & Dieringer, 2005, S. 781).

Das Verändern der Sehachsen gegeneinander (4) wird Vergenzbewegung genannt. Ändert sich während der Zielverfolgung der Abstand zwischen Augen und Objekt, ist eine Nah-, bzw. Ferneinstellung der Augen erforderlich, d. h. das Konvergieren, bzw. Divergieren (Bruggencate; Dieringer, 2005, S. 775, 781).

Sehschärfe und peripheres Sehen

Das Gesichtsfeld umfasst eine Breitenausdehnung von knapp 180° der Blickachse (Schmedding, 2012, S. 16).

Für das scharfe Sehen sind die Rezeptoren in der Netzhaut verantwortlich. In der Mitte der Netzhaut liegt die Fovea, wo die Netzhautzellen (Zapfen) in der höchsten Anzahl vorliegen (siehe Abbildung 24). Am Rand des Gesichtsfeldes reduziert sich die Anzahl der Zapfen deutlich und die Sehschärfe nimmt peripher (Eysel, 2005, S. 698 - 699) auf $\frac{1}{40}$ bis $\frac{1}{20}$ der maximalen Sehschärfe ab (Schlick et al., 2010, S. 325).

Bei 15-20° außerhalb der Fovea (parafoveal) treten die Stäbchen am häufigsten auf (Eysel, 2005, S. 698, 699). Für die Fixierung eines Objekts findet daher häufig eine Kopfdrehung statt, um das Objekt am Ort des schärfsten Sehens darzustellen (Schmedding, 2012, S. 17).

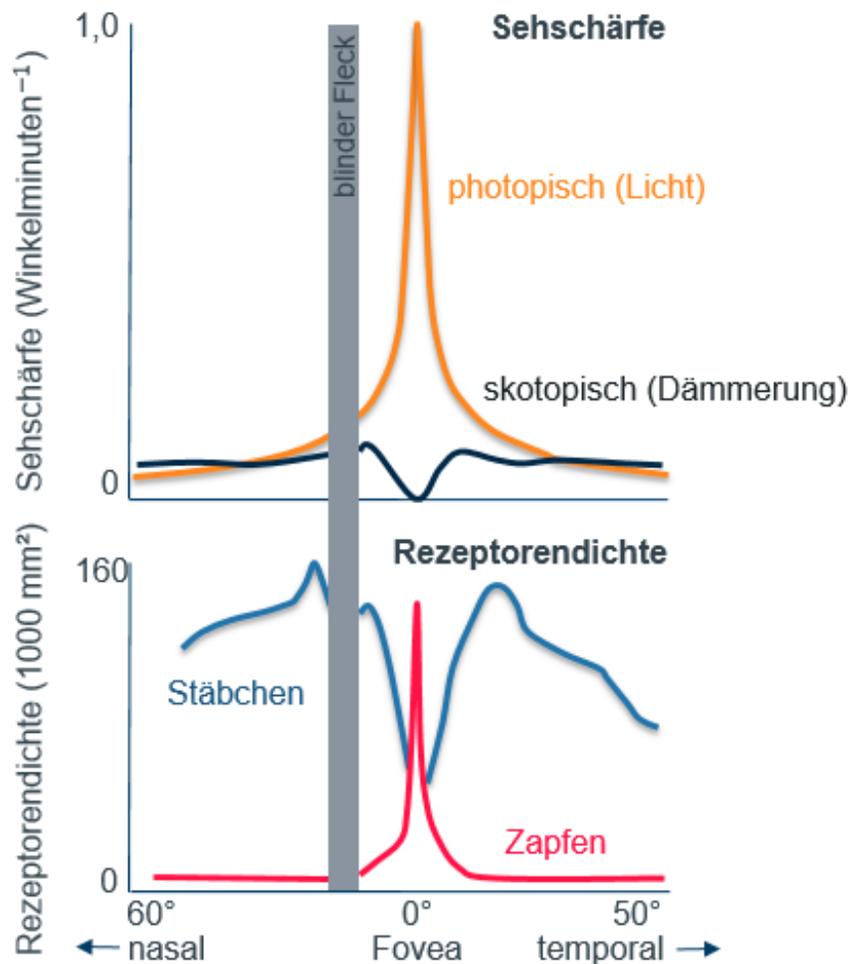


Abbildung 24: Sehschärfe und Zapfen- und Stäbchendichte in der Netzhaut (nach Eysel, 2005, S. 699)

In dem peripheren Bereich werden besonders Bewegungen ohne die Identifikation des bewegten Objekts wahrgenommen, da die Stäbchendichte größer ist als die Zapfendichte. Die Nervenzellen der Colliculi superiores reagieren schnell auf gleichartige, gewohnte Reize. Neuartigen Reize lösen jedoch längere Antwortzeiten aus. Somit werden periphere Reize schnell erkannt und mit einer Sakkade, als reflektorische Blickbewegung, in den scharfen Bereich der Fovea und des gemeinsamen Gesichtsfeldes zentriert (Eysel, 2005, S. 703; Birbaumer & Schmidt, 2003, S. 403), siehe später Abbildung 26.

Die Übertragung dieser medizinischen Erkenntnisse ermöglicht die Auslegung einer ergonomischen Maschinengestaltung. Der Ausgangspunkt der Blickfeldbeschreibung ist

die 0°-Achse; dies ist die Blickachse, die sich bei einer aufrechten Kopf- und Körperhaltung einstellt, siehe Abbildung 25.

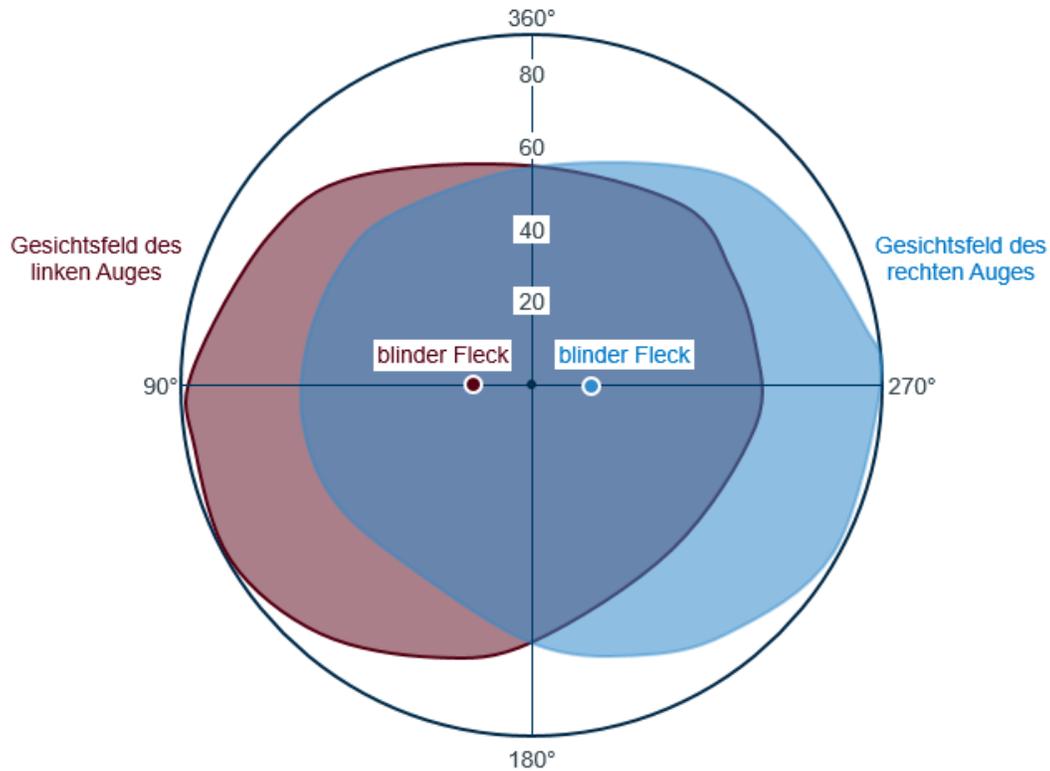


Abbildung 25: Gesichtsfeldkarte
(nach Eysel, 2005, S. 701)

Abbildung 26 zeigt den zulässigen horizontalen Sehraum ohne Kopfbewegung (Blickfeld) 15° beidseitig der 0°-Achse und den Sehraum mit Kopfbewegung 55° beidseitig der 0°-Achse. In der vertikalen Achse liegt der Sehraum ohne Kopfbewegung ebenfalls bei 15° oberhalb und unterhalb der 0°-Achse. Durch eine vertikale Kopfneigung erweitert sich der vertikale Sehraum auf 60° unterhalb der 0°-Achse (BGI/GUV-I 5048-2, 2010, S. 31 - 34, DIN EN ISO 14738, 2009, S. 9).

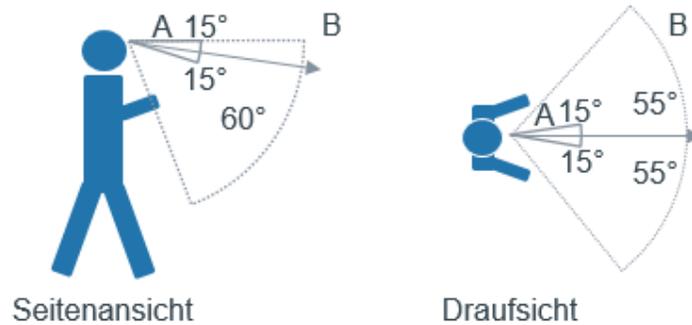


Abbildung 26: Blick- und beidseitiges Gesichtsfeld
Sehraum ohne (A) und mit (B) Kopfbewegung (nach BGI/GUV-I 5048-2, 2010, S. 31, 32, DIN EN ISO 14738, 2009, S. 9)

Im Bereich des Blickfeldes ($\pm 15^\circ$) sind die höchsten Raten von Fixationen sowie häufigere und schnellere Augenbewegungen möglich, da in diesem Bereich keine zeitliche Verzögerung durch die Kopfbewegung erforderlich ist (Gerke, 2015, S. 33).

Die Abbildung 27 zeigt hierzu den Verlauf einer kombinierten Augen- und Kopfbewegung. Zunächst erfolgt eine schnelle Bewegung des Auges mit Fokussierung auf das Objekt, daraufhin die nachgelagerte Bewegung des Kopfes. Der vestibulookuläre Reflex ermöglicht die Rückführung der Augen entgegen der Kopfbewegung bei andauernder Fokussierung, die sogenannte Rückstell-Sakkade (Bruggencate & Dieringer, 2005, S. 782).

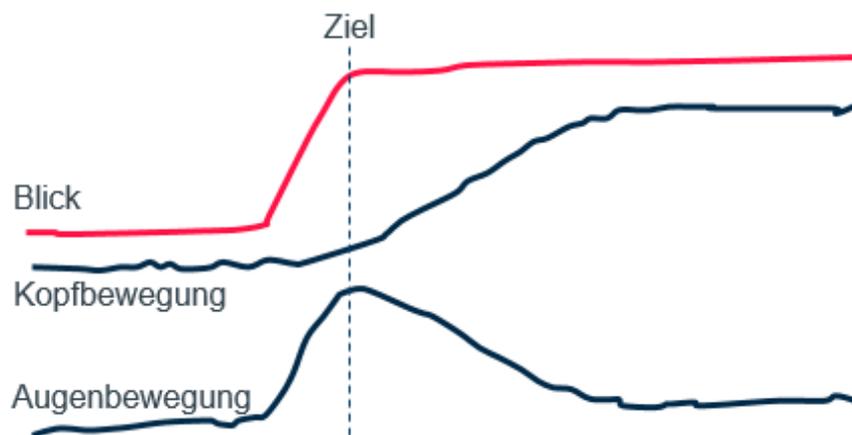


Abbildung 27: Koordination einer sakkadischen Augen-Kopfbewegung
(nach Bruggencate; Dieringer, 2005, S. 775, 782)

Einfluss der Lichtintensität

Scharfes Sehen ermöglicht das menschliche Auge nur bei Helligkeit, da die Photorezeptoren, die Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut auf diese angewiesen sind.

Die Photorezeptoren enthalten Sehfärbstoffe, die durch Licht angeregt werden müssen (Eysel, 2005, S. 691). Der Sehfärbstoff der Stäbchen heißt Rhodopsin und befindet sich in der Scheibchenmembran. Die Zapfen lagern ihren Sehfärbstoff in ihren Membraneinfaltungen. In ihrer Grundstruktur sind beide Sehfärbstoffe gleich aufgebaut, jedoch unterscheiden sie sich in ihrer Aminosäuresequenz.

Das photopische Sehen (Tagessehen) wird durch die Zapfen ermöglicht. Bei dem Übergang zum skotopischen Sehen (Dämmerungs- und Nachtsehen) ergibt sich eine Dunkeladaptation, die von den Stäbchen übernommen wird. Bei dem Umschalten von Zapfen- auf Stäbchensehen handelt es sich um einen neuronalen Mechanismus (Eysel, 2005, S. 695).

Bereits bei mittlerem Tageslicht sind Veränderungen in der Struktur von zentralem und peripherem Sehen möglich (Schneider, 1971, S. 559-560; Wittling, 1976, S. 129).

Die Lichtintensität ist als Einflussfaktor bezüglich der kognitiven Arbeitsleistung und der Aufmerksamkeit zu berücksichtigen (Werth et al., 2013, S. 193), wird jedoch im weiteren Verlauf nicht explizit betrachtet.

Pupillenreaktion und mentale Informationsverarbeitung

Das menschliche Nervensystem unterteilt sich in das somatische und das vegetative Nervensystem. Das somatische Nervensystem lässt sich bewusst steuern, das vegetative nur in geringem Maße, da es der Aufrechterhaltung des Körpermilieus dient. Das vegetative Nervensystem lässt sich wiederum in zwei Kategorien untergliedern: Der Sympathikus dient der Energiemobilisierung und Aktivitätssteigerung, der Parasympathikus der Konservierung und dem Wiederaufbau der Körperenergien.

Die Auswirkung des Sympathikus (strahlenförmige Muskelschicht) auf das Auge zeigen sich durch eine Pupillenerweiterung und der Parasympathikus (ringförmige Muskelschicht) durch eine Pupillenverengung (Trepel, 2012, S. 295). Die Steuerung des Pupillendurchmessers dient in erster Hinsicht der Regulation des einfallenden Lichts. Im Zusammenhang mit den Methoden des Eye-Trackings können die Pupillenreaktionen insbesondere als Indikator der Beanspruchung, Fokussierung und des Erschreckens

dienen. Einige weitere Beispiele für Sympathikus und Parasympathikus sind in Anhang 2 auf S. 212 dargestellt.

Die Steuerung von Sympathikus und Parasympathikus erfolgt durch Reflexe auf Hirnstamm und Rückenmark sowie übergeordneten Zentren, zu denen neben Hypothalamus und Formatio reticularis auch das limbische System gehört (Trepel, 2012, S. 297).

Aufgrund der vielen Einflussfaktoren weist das Maß der Pupillengröße eine geringe Diagnostizität auf (Lysaght et al., 1989, S. 146), es kann jedoch gut als sensitiver Beanspruchungs- oder objektiver Unterforderungsindikator herangezogen werden (Dörr, 2015, S. 138; Schlick et al., 2010, S. 405).

Lidschlussaktivität

Der Lidschluss beschreibt ein schnelles (durchschnittlich 250 ms) und synchrones Schließen der Augenlider (Hargutt, 2003, S. 12, 15). Dieses besteht aus willkürlichen und unwillkürlichen motorischen Prozessen, die willentlich, reflexgesteuert und periodisch auftreten können (Hargutt, 2003, S. 7).

Das spontane Blinzeln erfolgt mit einer gesteigerten Frequenz. Diese asynchrone und sehr hohe Entladungsfrequenz entsteht in der palpebralen Region. Die Entladungsfrequenz bei dem willentlichen Blinzelnverhalten ist deutlich geringer (Hargutt, 2003, S. 10).

Dieser Mechanismus kann als Indikator für visuelle Beanspruchung herangezogen werden. Ein Zustand der Monotonie ist beispielsweise durch eine gesteigerte Lidschlussfrequenz beobachtbar (Richter, 2000a, S. 7). Die Literatur zeigt jedoch widersprüchliche Ergebnisse bezüglich eines Zusammenhangs der Lidschlussfrequenz mit der mentaler Beanspruchung (Schlick et al., 2010, S. 406). Weiterhin haben auch die äußeren Faktoren, wie ein Luftzug oder der Lichteinfall einen Einfluss auf das Blinzelnverhalten, wodurch eine Zuordnung zu mentalen Einflüssen äußerst unsicher ist (Hargutt, 2003, S. 12).

Aus diesen Gründen wird der Lidschluss im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht zu Analyse Zwecken verwendet.

Der Zusammenhang von Blickbewegungen und Kognition

Die Bewegung der Augen kann als guter Indikator für die Verschiebung der Aufmerksamkeit gewertet werden (Müller et al., 2015, S. 25). Im Allgemeinen kann somit komplementär von einem Zusammenhang zwischen der Fixation und der kognitiven Aufmerksamkeit ausgegangen werden. Die Theorie zeigt einige Ausnahmen, die sich durch eine Aufmerksamkeitsverschiebung des extrafovealen und peripheren Sehens zeigen. Dies kann dazu führen, dass sowohl eine Fixation ohne die kognitive Verarbeitung als auch eine kognitive Verarbeitung ohne Fixation auf einem entsprechenden Objekt durchgeführt wird (Schuhmacher, 2012, S. 115).

Die folgenden Aspekte können in Untersuchungen als Indikatoren für einen Zusammenhang von Blickbewegung und Kognition herangezogen werden:

- Die Dauer einer Fixation bietet einen Hinweis auf die Konzentration. Eine lange Fixationsdauer kann jedoch auch durch eine Irritation entstehen (Wentura & Frings, 2013, S. 52).
- Die Blickrichtung kann ein Indikator für die Aufmerksamkeitsfokussierung sein (Müller et al., 2015, S. 25).
- Die Schnelligkeit mit der eine Blickbewegung sich von einem ablenkenden Reiz entfernt kann ein Indikator für dessen Irrelevanz sein (Müller et al., 2015, S. 36).
- Durch die Schnelligkeit, mit der ein Reiz auftritt, wird die Aufmerksamkeit automatisch verschoben und eine aktuelle Handlung unterbrochen (Müller et al., 2015, S. 36).
- Die Blickbewegungsbahn (Trajektorie) kann durch irrelevante Reize in der Bahnumgebung abgelenkt werden (Wentura & Frings, 2013, S. 52).
- Das Ziel einer Blickbewegung kann Aufschluss über den Inhalt des kognitiven Vorgangs geben (Wentura & Frings, 2013, S. 52).

Der Zusammenhang von Blickbewegung und Handlung

Die Blickbewegung zur Erfassung der Umwelt (Exploration) dient als Grundlage aktueller Handlungen und ist diesen ca. 0,5 Sekunden voraus, beispielsweise beim Lesen oder Autofahren (Joos et al., 2003, S. 142; Buswell, 1920, S. 65 ff.; Land & Furneaux, 1997, S. 1232).

Eine Aufmerksamkeitsverschiebung ist grundsätzlich an eine Verschiebung der Blickrichtung gekoppelt und findet kurz vor der Augenbewegung statt (Müller et al., 2015, S. 27).

Rizzolatti et al. (1987, S. 35) zeigen in der prämotorischen Theorie der Aufmerksamkeit, dass Aufmerksamkeit handlungssteuernd wirkt. Dies gilt neben der Augenbewegung auch für darauffolgende sequentielle Körperbewegungen, also der Handlung, siehe Abbildung 28.



Abbildung 28: Ablauf der Augenbewegung und Handlung (Müller et al., 2015, S. 28; Land & Furneux, 1997, S. 1232).

Somit lässt sich annehmen, dass jeder aufmerksamkeitsbasierten Bewegung eine Blickbewegung in die Richtung der Aufmerksamkeitsverschiebung vorausgeht.

Dementsprechend kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass auch Routinebewegungen, die keine Aufmerksamkeit bedingen, ein Blick vorausgeht. Dies ist relevant für Untersuchungen mit routinierten Fertigungsmitarbeitern, bei denen, nach dieser These, von abweichendem Blickverhalten auszugehen ist.

Zusammenfassung

Durch die Methoden des Eye-Trackings werden die Aufmerksamkeit und die Ablenkung des Menschen messbar. Diese Möglichkeit des Eye-Trackings wird in den Versuchen dieser Arbeit als Grundlage verwendet. Die Blickverschiebungen in Form von Sakkaden sowie die Fixationen zeigen eine Ablenkung an und ebenso, auf welchen Bereichen oder Gegenständen die Aufmerksamkeit von Probanden liegen.

Weiterhin stellt dieses Kapitel vor, welche neuronalen Verschaltung mit dem Blickverhalten und der Aufmerksamkeit, bzw. der Ablenkung verknüpft sind. In Verbindung mit dem kognitiven Verarbeitungszyklus (Kapitel 2.3.2) zeigt dies, wie die wahrgenommenen Informationen in eine Handlung, körperliche Reaktion oder Emotion umgewandelt werden können.

Diese Zusammenhänge stellen die Basis für die Beantwortung der vorliegenden Fragestellungen dar.

3.2 Evaluierung mittels Fragebogen

Die Erhebung mittels schriftlichem Fragebogen ist in der psychologischen Forschung eine dominierende Methode. Insbesondere in der quantitativen Forschung wird die schriftliche Befragung gewählt. Die wissenschaftliche Fragebogenmethode dient dabei der „zielgerichteten, systematisch regelgeleiteten Generierung und Erfassung von verbalen und numerischen Selbstauskünften“ (Döring & Bortz, 2016, S. 398). Dies wird bei der Fragebogenmethode ermöglicht, da „sprachlich klar strukturierte Vorlagen zur Beurteilung“ vorliegen, wodurch die einzelnen Personen bei ihren Antworten anhand der gleichen Merkmale urteilen (Mummendey & Grau, 2014, S. 13).

Um die Anforderungen an den Aufbau eines Fragebogens zu erfüllen ist die Einhaltung von klassischen Testgütekriterien der Items erforderlich. Die Fragen und Aussagen, über welche die Probanden entscheiden sollen, werden als Items bezeichnet (Mummendey & Grau, 2014, S. 13). Die Kriterien sind folgend kurz zusammengefasst:

- Objektivität: Der Grad, in dem die Ergebnisse einer Untersuchung vom Untersucher unabhängig sind (Lienert, 1969).
- Reliabilität: Der Grad der Genauigkeit, mit dem der Test ein Merkmal misst, unabhängig davon, ob dieses gemessen werden soll (Lienert, 1969).
- Validität: Der Grad der Genauigkeit, mit dem der Test ein Merkmal misst, das tatsächlich gemessen werden soll (Lienert, 1969).
- Diagnostizität: Der Test liefert nicht nur ein Gesamtergebnis, sondern bietet Rückschlüsse auf den Bereich der Informationsverarbeitung, in dem vermeintliche Engpässe auftreten (Pfendler, 1990, S. 159).
- Interferenzfreiheit: Die Messung der einzelnen Kriterien soll einen möglichst geringen Einfluss auf das Verhalten des Probanden während des Tests haben (Pfendler, 1990, S. 159).

Die Antworten auf diese Items sollen vergleichbar und messbar ausgelegt werden. Dies wird durch die Zuordnung einer Skala ermöglicht (Porst, 2014, S. 71), die folgende Anforderungen erfüllen soll:

- Die Eigenschaften der Skala sollten so gewählt werden, dass das abzufragende Merkmal inhaltlich angemessen abgebildet und das Item verständlich formuliert ist. Weiterhin sollen möglichst viele Ausprägungsvarianten abgefragt werden. Die Items sollen eindeutige Ergebnisse zur Trennung von schwach und stark ausgeprägten Merkmalen der Probanden hervorbringen. Die Abfolge der Items soll sinnvoll und verständlich gewählt werden.
- Eine Skala kann eindimensional und mehrdimensional aufgebaut werden. Bei einer mehrdimensionalen Skala ist die Erfassung und Berechnung der Subdimensionen und Subskalenwerte der einzelnen Items erforderlich.
- Für die Festlegung des Skalenniveaus ist die Überprüfung erforderlich, ob die Messwerte aus dem Intervallskalenniveau resultieren.
- Die Anwendung und Auswertung der Skala erfordern eine objektive Festlegung. Diese sollte nicht personenabhängig unterschiedlich ausfallen.
- Potentielle Messfehler sollen einen geringen Einfluss auf die Skalenwerte aufweisen. Dies ist mit mindestens einem Reliabilitätskoeffizienten zu testen.
- Die Items und zugehörigen Skalenwerte müssen das zu messende Merkmal tatsächlich erfassen (Döring & Bortz, 2016, S. 268).

Für den Bereich der Usability wird gerne auf den etablierten *NASA Task Load Index*⁹ (NASA TLX) zurückgegriffen (Hart & Staveland, 1988). Dies ist eine der wichtigsten mehrdimensionalen subjektiven Beanspruchungsmethoden (Schlick et al., 2010, S. 416) und zeichnet sich durch hohe Validität, sensitive Ergebnisse und geringe Streuung aus (Pfundler, 1990, S. 159).

⁹ Weitere etablierte Usability-Bewertungsverfahren sind System Usability Scale, Subjective Workload Assessment Technique (deutsche Version von Schick et al. 1989) und Zwei-Ebenen-Intensitäts-Skala (Pfundler, 1993).

Der NASA TXL besteht aus sechs bipolaren Subskalen. Die ersten drei Skalen beziehen sich auf die Anforderungen an die Versuchsperson (geistige Anforderung, körperliche Anforderung, zeitliche Anforderung) und die weiteren drei Skalen auf die Aufgabe des Versuchs (Aufgabenerfüllung / Leistung, Anstrengung¹⁰ und Frustration¹¹). Die Antwortskalen sind in zwanzig Stufen unterteilt (Pfundler, 1990, S. 160).

Im Bereich der Robotik liegen zwei sehr bekannte und etablierte Fragebögen vor.

Bei der *Negative attitude toward robots scale (NARS)* handelt es sich um einen Fragebogen, der sich auf die Kommunikation mit einem menschenähnlichen Roboter¹² konzentriert und sich daher für die, in dieser Arbeit angestrebte industrielle Untersuchung weniger eignet (vgl. Nomura et al., 2005, S. 3). Die einzige Frage des NARS, die im Rahmen dieser Arbeit sinnvoll eingesetzt werden kann, ist Item 4: „I would feel uneasy if I was given a job where I had to use robots.“. Der Aspekt dieses Items, das Wohlbefinden des Probanden, wird im Fragebogen zu dieser Arbeit mit dem ersten Item im Bereich der allgemeinen Abschlussfragen „Würden Sie sich wohl fühlen, wenn Sie auf der Arbeit von einem [solchen] Roboter unterstützt werden?“ erfragt (siehe Abschnitt 4.2.4).

Die *Robot Anxiety Scale (RAS)* von Nomura, Suzuki, Kanda und Kato (2006) dient der Ermittlung der unterschiedlichen Reaktionen von Menschen auf menschenähnliche oder menschenunähnliche Roboter (Beer et al., 2011, S. 9). Bei einer Übertragung der Fragen in den industriellen Kontext ist somit insbesondere die Validität der Items nicht sichergestellt.

Die einzelnen Items eines Fragebogens enthalten direkte Fragen oder Aussagen, denen die Befragten zustimmen sollen. Die Zustimmung muss auf einer Antwortskala eingeordnet werden, die nach Cox (1980, S. 420) fünf bis neun Skalenwerte enthalten

¹⁰ verhaltensbezogene subjektive Aufgabenanforderung

¹¹ psychologische Konsequenzen der Aufgabenanforderung

¹² Beispielhaft seien zwei Items aus dem NARS-Fragebogen vorgestellt:

Item 1: „I would feel uneasy if robots really had emotions.“

Item 12: “I would feel paranoid talking with a robot.“ (Nomura et al., 2006, S. 2).

sollte. Die Anzahl erscheint geeignet, um eine genügend differenzierte und gleichzeitig für den Probanden übersichtliche Antwortmöglichkeit zu geben.

Skalen in Fragebögen können entweder eine gerade oder eine ungerade Anzahl an Auswahlmöglichkeiten bieten. Bei ungeraden Skalenpunkten ist ein Mittelwert vorhanden, der formal lediglich den Mittelwert der Skala darstellt, von Probanden jedoch häufig als neutrale Antwortmöglichkeit, also eine Fluchtkategorie wahrgenommen wird. Eine gerade Anzahl der Skala verhindert den Erhalt von neutralen Aussagen. Dies soll dazu dienen, dass sich der Befragte dafür entscheiden muss, ob er eher zustimmt oder eher ablehnt (Porst, 2014, S. 83).

Items, die einer Zusammengehörigkeit unterliegen und in ihrem gemeinsamen Kontext gesehen werden sollen, können gemeinsam ausgewertet werden. Dies ermöglicht die Erfassung eines psychologischen Konstrukts, das über die einzelne Betrachtung von Items hinausgeht (Mummendey & Grau, 2014, S. 13). Dies hat sich innerhalb der Auswertung für den Fragebogenteil des NASA TLX bewährt. Nach Beantwortung der Subskalen erfolgt im originalen Verfahren eine Gewichtung durch fünfzehn Paarvergleiche, woraus eine Gewichtung der Skalen von 0 bis 5 erstellt wird (Pfundler, 1990, S. 160). Pfundler (1993, S. 27) zeigte, dass Testgütekriterien und Differenzierung verbessert werden können, indem ein ungewichteter Mittelwert der sechs Skalen (0 bis 10) gebildet wird. Eine hohe wahrgenommene Beanspruchung während des Versuchs entspricht einem hohen Skalenwert in diesem Verfahren.

3.3 Zusammenfassung

Die folgenden Untersuchungen sollen mittels Eye-Tracking System durchgeführt werden, wobei in jeder Versuchsdurchführung ein spezifisches Kriterium betrachtet wird. In den verschiedenen Versuchsphasen werden die Charakteristiken der Arbeitsplatzgestaltung variiert. Das Eye-Tracking System soll entsprechend der veränderten Charakteristiken Unterschiede im Blickverhalten der Probanden aufzeigen. Zu den betrachteten Charakteristiken zählen insbesondere der Abstand zwischen dem Menschen und dem Roboter sowie die Arbeitsraumgeometrie.

Die Literatur zeigt keinen direkt übertragbaren Fragebogen für die industrielle Untersuchung einer Mensch-Roboter-Interaktion. Für die nachfolgenden Betrachtungen

wird daher auf verschiedene Fragebogen zurückgegriffen, die zu einem eigenen Fragebogen zusammengesetzt werden.

Die gemeinsame Aufnahme des subjektiven Empfindens mittels Fragebogen und der neuronalen Prozesse durch das Eye-Tracking soll eine Verknüpfung von Subjektivität und Objektivität ermöglichen (Klinke, 2005b, S. 733). Die subjektiven Werte können einen Aufschluss auf die Gefahrenkognition des Menschen geben. Die aus der individuellen Wahrnehmung entstehenden psychologischen Reaktionen sollen Aufschluss über die Wirkung des Roboters auf den Menschen geben (Braune, 2015, S. 11).

Die Versuche bieten eine sinnvolle Vergleichbarkeit, um Erfahrungen und Ergebnisse hinsichtlich der Mensch-Roboter-Kooperation zu gewinnen.

4 Versuchsdurchführungen

Diese Untersuchungen sollen die physische und psychische Belastung von Probanden in Form von Aufmerksamkeit und Ablenkung in einer verknüpften Mensch-Roboter-Kooperation aufzeigen. Als Werkzeuge dienen dabei die Methoden des Eye-Trackings zur Verfolgung des Blickverhaltens sowie ein Fragebogen.

Das Szenario des Hauptversuchs soll ein Beispiel für die große Bandbreite möglicher Einsatzgebiete der MRK darstellen. Daher soll ein Zusammenspiel von Mensch und Roboter kreiert werden, wie es beispielsweise bei der Flexibilisierung einer Fertigungslinie oder durch eine ergonomische Maßnahme entsteht (vgl. Matthias, 2013, S. 4). Ein solches nachträgliches Integrieren eines Roboters stellt Fertigungsplaner häufig vor eine große Herausforderung, denn manuelle Arbeitsplätze sind aus Gründen wie der bereitstehenden Fläche oder der Anlieferungsform der Bauteile meist nicht optimal für den Einsatz eines Roboters ausgelegt. Die Prüfung der technischen Integrierbarkeit kann oftmals nur durch aufwendige Machbarkeitsstudien erfolgen, bei deren Erfolg noch keine Akzeptanz des technischen Systems durch die Mitarbeiter sichergestellt ist.

Für solche Anwendungsfälle der MRK soll diese Hauptuntersuchung eine Empfehlung hinsichtlich der festgelegten Charakteristiken liefern.

4.1 Vorbereitende Versuche

Die praktischen Untersuchungen sollen die Ablenkung von Probanden ermitteln, während diese mit einem Roboter zusammenarbeiten.

Dem Hauptversuch dieser Arbeit werden fünf praktische Voruntersuchungen vorgeschaltet, die ausgewählte Charakteristiken der Mensch-Roboter-Kooperation untersuchen.

Diese fünf Versuche behandeln die Ablenkung von Probanden durch einen Roboter unter verschiedenen Gesichtspunkten. Zunächst werden die Ablenkung und das Erschrecken eines Probanden im horizontalen Raum betrachtet. Die beiden darauffolgenden Versuche übertragen diesen Erschreckensraum in die vertikale Ebene. Der vierte Versuch betrachtet ein auffälliges, farbliches Merkmal, das in den ersten drei Versuchen

zu divergierenden Ergebnissen führte. Im abschließenden Vorversuch wird der Proband erstmals in Bewegung versetzt, sodass der Ablenkungsraum deutlich vergrößert wird.

Als Roboter wurde auf Basis der Marktbetrachtung nach Anhang 1 das Modell „Kuka flex fellow“ mit einem LBR iiwa mit 7 kg Traglast ausgewählt, siehe Abschnitt 4.2.1. Besonders geeignet erschien dieses Robotermodell aufgrund der hohen Sensitivität, der schnellen Verfügbarkeit sowie der vorhandenen Ressourcen für die Programmierung des Manipulators.

Die nötigen Charakteristiken zur Beschreibung einer Zusammenarbeit von Mensch und Roboter wurden durch die Literaturrecherche ermittelt. Viele der Charakteristiken betreffen das menschliche Verhalten sowie körperliche Reaktionen, die größtenteils situationsbezogen auftreten (Herkner, 1975, S. 103). Die erstrangigen Charakteristiken sollen in die praktischen Untersuchungen aufgenommen und analysiert werden.

Ein Aspekt der zweiten Fragestellung dieser Arbeit soll die ergonomische Gestaltung von Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen sein. Hierfür ist zu ermitteln, in welcher Form ein kooperierender Roboter bei einem Menschen Beanspruchung auslöst und wie diese vermieden werden kann. Als Hauptcharakteristikum wird die Bewegungsform des Roboters betrachtet.

Diese wird folgend untersucht, wobei auf den Aspekt der Geschwindigkeit verzichtet wird, da er bereits hinreichend betrachtet wurde, bzw. in der normgemäß ausgelegten MRK wenig Bedeutung ausweist. Vorangegangene Studien untersuchten Roboter-geschwindigkeiten zwischen 200 mm/s (Arai et al., 2010, S. 7) und 1400 mm/s (Koppenborg et al., 2013, S. 417).

Bis zum Jahre 2011 orientierten sich die Geschwindigkeiten in der Mensch-Roboter-Kooperation an den entsprechenden Kontaktkräften für Türen und Tore aus der DIN EN 12453 (2014, S. 17) und erlaubten höhere Werte für die MRK als die seit 2016 gültige Norm ISO/TS 15066. Durch die aktuelle Normung insbesondere der ISO/TS 15066 (2016), sind Geschwindigkeit und Beschleunigung eines kooperierenden Roboters eingeschränkt (Stach, 2015, S. 22). Dem Druck und der Kraft entsprechend, mit denen eine Bewegung im Fall eines Kontaktes auf einen Menschen einwirkt, sind Geschwindigkeit und Beschleunigung des Roboters genau definiert und limitiert. Die Geschwindigkeiten der Roboterbewegungen der nachfolgenden Versuchsreihen wurden auf Basis der Normung ausgelegt und liegen bei maximal 250 mm/s.

Diese Geschwindigkeit wurde in den Studien von Koppenborg et al. (2013, S. 418) von Probanden als „sehr niedrig“ empfundenen und liegt unterhalb der Geschwindigkeit von 500 mm/s, die Arai et al. (2010, S. 7) als Beanspruchung deklarieren.

Als Einordnung der Geschwindigkeit wird an dieser Stelle auf eine Referenzmessreihe mittels Kinect-Kamera hingewiesen. Die Versuchsreihe mit 42 Testpersonen, die einen industriellen Montageprozess durchführen, zeigt eine durchschnittliche Geschwindigkeit der rechten Hand von ca. 224 mm/s und der linken Hand von ca. 191 mm/s (Koczula, 2018). Die nachfolgend verwendeten Robotergeschwindigkeiten liegen somit in ihrem maximalen Wert leicht oberhalb der durchschnittlichen Geschwindigkeit der menschlichen Handbewegung.

Für die Versuchsdurchführungen¹³ in dieser Arbeit wird einerseits ein Fragebogen sowie andererseits eine objektive Untersuchung mittels Eye-Tracking System eingesetzt. Dadurch kann die subjektive Einschätzung der Probanden durch objektive Untersuchungsergebnisse ergänzt werden (Riedel, 2003, S. 2).

Mit einer Eye-Tracking Analyse wird das Blickbewegungsmuster des Menschen in vorher definierten Bereichen, den „Areas of Interest“, abgebildet. Abweichungen des Blicks von diesen AOIs sollen die Ablenkung der Probanden aufzeichnen. Die Fixationsdauer in solchen AOIs kann als Indikator für Beanspruchung herangezogen werden (Lysaght et al., 1989, S. 144). Mit dieser Methode wird demzufolge unter anderem die Reaktion des Menschen auf den Roboter abgebildet.

¹³ Lazarus et al. (1964) zeigten, dass ein und dieselbe Wahrnehmung mittels verschiedener Erläuterungen in geringerer oder höherer Intensität stattfinden kann (Herkner, 1975, S. 51; Mandler, 1979, S. 244; Becker-Carus, 2011, S. 496). Während der Versuchsdurchführungen ist somit auf eine besonders neutrale Haltung gegenüber den Probanden zu achten. In allen Versuchsvarianten werden aus Gründen der Vergleichbarkeit dieselben Analysen und Bewertungsstrategien angewandt.

4.1.1 Voruntersuchung 1 – Entfernung und Winkel in der MRK

In dem ersten Vorversuch soll die prinzipielle Auswirkung eines Roboters auf einen, unmittelbar im Umfeld beschäftigten Menschen hinsichtlich Abstand und Winkel getestet werden. Das Versuchsdesign entspricht dem MRK Level drei, der sequentiellen MRK.

Grundlegende Untersuchungen zum Abstand zwischen Mensch und Roboter liegen bereits vor (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Aufzeichnung der Abstandswirkung wird allerdings erstmalig mittels Eye-Tracking untersucht. In diesem Vorversuch soll weiterhin eine Referenz für die weiteren Versuchsszenarien erstellt werden.

Die Mensch-Roboter-Kooperation findet häufig ihren Einsatz, wenn ein Mensch Unterstützung bei seiner Tätigkeit, beispielsweise dem Heben von schweren Bauteilen, benötigt. Für die Bewertung dieser engen Zusammenarbeit wird der Vergleich mit der klassischen Abstandstheorie nach Hall (1966) von Menschen untereinander herangezogen. Hall (1966, S. 116) teilte die Entfernungen zwischen Menschen in vier dynamische Distanzzonen ein: intim (bis ca. 45 cm), persönlich (von ca. 45 cm bis ca. 120 cm), sozial (von ca. 1,20 m bis ca. 3,50 m) und öffentlich (von ca. 3,50 m bis ca. 7,00 m). Die nachfolgenden Versuchsdesigns zwischen Mensch und Roboter werden ebenfalls in die Distanzzonen nach Hall eingeteilt, um eine Einordnung des Abstands zwischen Mensch und Roboter zu ermöglichen.

Prinzipielle Untersuchungen liegen ebenso zu der Wirkung von verschiedenen Winkeln einer Roboterbewegung auf einen Menschen vor. Bei Thiernemann erfolgt die Bewertung anhand einer Befragung der Probanden nach ihrem Sicherheitsempfinden. Den Probanden steht dabei eine dreistufige Skala zur Bewertung zur Verfügung (Thiernemann, 2005, S. 74). Thiernemann (2005, S. 74) lässt die Probanden entscheiden, ob sie eine Bewegung als „frontal“, „vorbei“ oder „weg“ empfinden. Thiernemann schlussfolgert, dass bei einem großen Annäherungswinkel ein großes Sicherheitsempfinden vorliegt, bei kleinem Winkel entsprechend ein niedriges. Diese Erkenntnisse werden in Vorversuch 1 durch die objektiveren Erfassungsmethoden des Eye-Trackings ergänzt.

In Vorversuch 1 wird eine einfache Umgebung gewählt, um zunächst das Eye-Tracking System zusammen mit dem bewegten Roboter ohne weitere Einflussfaktoren zu testen.

Die Versuche finden in einer idealisierten Umgebung statt, beispielsweise einem Besprechungsraum. Diese Versuchsumgebung soll die sonstigen Einflüsse auf den Probanden, die eine industrielle Produktionsumgebung normalerweise aufweist, wie

bewegte Maschinenteile, Vibrationen und Fahrzeuge, minimieren. Bei der Versuchsdurchführung im Produktionsumfeld muss die Gewöhnung an diese Bedingungen bei der Auswahl der Probanden berücksichtigt werden. Mitarbeiter, die täglich an der betrachteten Linie arbeiten, werden einer Gewöhnung an diese Bedingungen unterliegen, wodurch mögliche Reaktionen weniger stark ausfallen als bei Probanden, die dieses Umfeld nicht gewöhnt sind.

Um ein möglichst kleines und eingrenzbare Blickfeld zu simulieren, wird ein Bildschirm- bzw. Schreivarbeitsplatz analog zu Thiernemann (2005) genutzt. Dadurch wird für diesen Versuch die Fokussierung auf die allgemeinen Verhaltensweisen und Reaktionen möglich und potentielle Konflikte und Problemstellungen können im Vorfeld erkannt werden.

In Vorversuch 1 sollen zunächst unterschiedliche Abstände zwischen Mensch und Roboter sowie verschiedene Blickwinkel bis hin zur peripheren Wahrnehmung getestet werden. Als Merkmale werden dabei die Fixationen in den einzelnen AOIs und deren Dauer betrachtet.

Hypothesen zur Voruntersuchung

Der Vorversuch 1 soll ermitteln, in welcher Form ein „psychischer Sicherheitsabstand“ zum Roboter erforderlich und in welche Distanzzone der Mensch-Mensch-Interaktion dieser einzuordnen ist. Für den Vorversuch 1 werden zwei Thesen aufgestellt:

VH1.1: Aufbauend auf der Studie *Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly* (siehe Abschnitt 2.3.3) wird angenommen, dass mit sinkender Distanz zwischen Mensch und Roboter die Einflussnahme auf den Menschen steigt, die Ablenkung vom Fixpunkt / Arbeit steigt und die Arbeitsleistung somit sinkt (siehe Abschnitt 2.3.3).

Ein Roboter auf Bewegungsbahn c (siehe Abbildung 29) wirkt somit stärker auf den Menschen ein, als ein Roboter auf Bewegungsbahn a. Aus diesen Gründen wird die Versuchsdurchführung mit der vermeintlich schwächsten Reaktion auf Bewegungsbahn a gestartet.

Die Literaturrecherche lässt vermuten, dass die Arbeitsumgebung eines Menschen in drei Bereiche unterteilbar ist: den direkten Sehbereich (Blickfeld), den Sehbereich mit Kopfbewegung und den peripheren Sehbereich. Im Hinblick auf die MRK ist

insbesondere eine mögliche periphere Ablenkung des Menschen durch die Roboterbewegung denkbar, wenn Mensch und Roboter beispielsweise in einer Montagelinie nebeneinander stehend ihre Tätigkeiten ausführen.

VH1.2: Die Reaktion des Menschen fällt bei peripherer Bewegung (Roboterposition 3) stärker aus als bei einer Bewegung im direkten Blickfeld (Roboterposition 1).

Der Versuch wird auf Bewegungsbahn a mit Roboterposition 1 begonnen. Es wird von der Annahme ausgegangen, dass die Reaktion auf den Roboter einer Gewöhnung unterliegt und Fixationen auf den Roboter somit über die Zeit abnehmen. Der Versuchsablauf wird daher so gewählt, dass mit der erwartungsgemäß geringsten Reaktion gestartet wird (direktes Blickfeld, größte Entfernung, Pos. 1a). Aufgrund der Kürze des Versuchs sollte der potentielle Gewöhnungseffekt einen deutlich geringeren Einfluss haben als die veränderlichen Konstellationen über die drei Versuchsdurchläufe hinweg, sodass trotz Berücksichtigung des Gewöhnungseffekts von einer Steigerung der Blickablenkungen auszugehen ist.

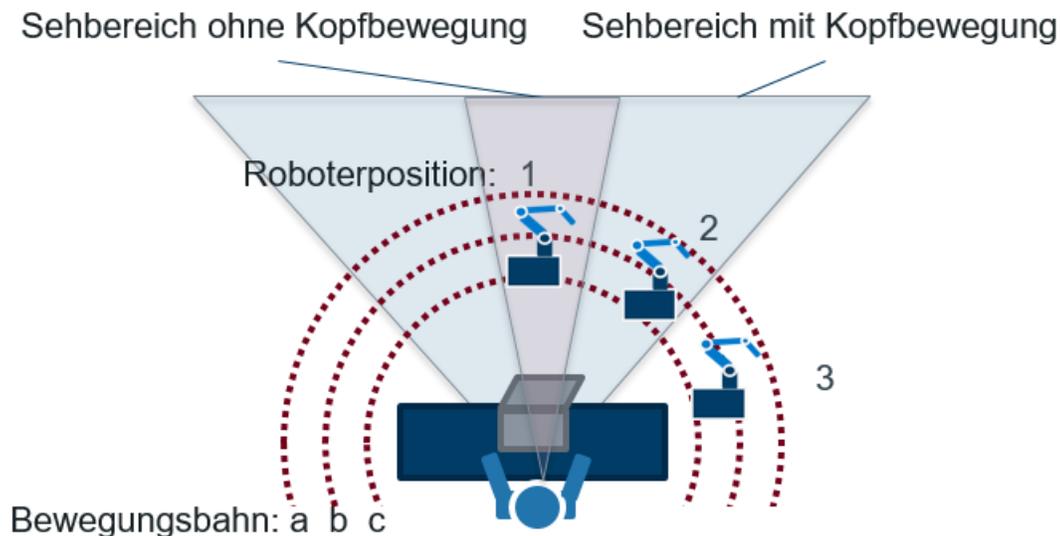


Abbildung 29: Vorversuch 1 – Schematischer Aufbau des Versuchs

Versuchsdesign und -durchführung

Der Vorversuch findet in einem Besprechungsraum im Bereich der Fertigung statt. Es ist davon auszugehen, dass nur geringe Umgebungseinflüsse wirken, da die Umgebung den Probanden bekannt ist. Der Raum zeichnet sich durch große Fenster mit Blick auf

die Produktionslinien und die in der direkten Nähe angebrachte Hängebahn aus, wodurch bereits im Vorversuch eine minimale Einbettung in den industriellen Kontext stattfindet.

Im Versuch verrichtet der Roboter eine vereinfachte Handlingsaufgabe, wie sie in großer Anzahl in einem Komponentenwerk zu finden ist; das Handling von Getrieberädern zwischen einer Transportpalette auf einem Verkettungsband und einem Blister¹⁴, siehe Abbildung 30. In der Untersuchung wird das Handling in einer vereinfachten Form simuliert, indem der Roboter Getrieberäder zwischen verschiedenen Positionen in einem Blister transportiert¹⁵. Insgesamt werden neun Getrieberäder von einer Seite des Blisters zur anderen befördert und daraufhin wieder zurück auf ihre ursprüngliche Position gelegt. Die Anwendung ist in Dauerschleife programmiert. Ein vollständiger Durchlauf dauert etwa zehn Minuten.

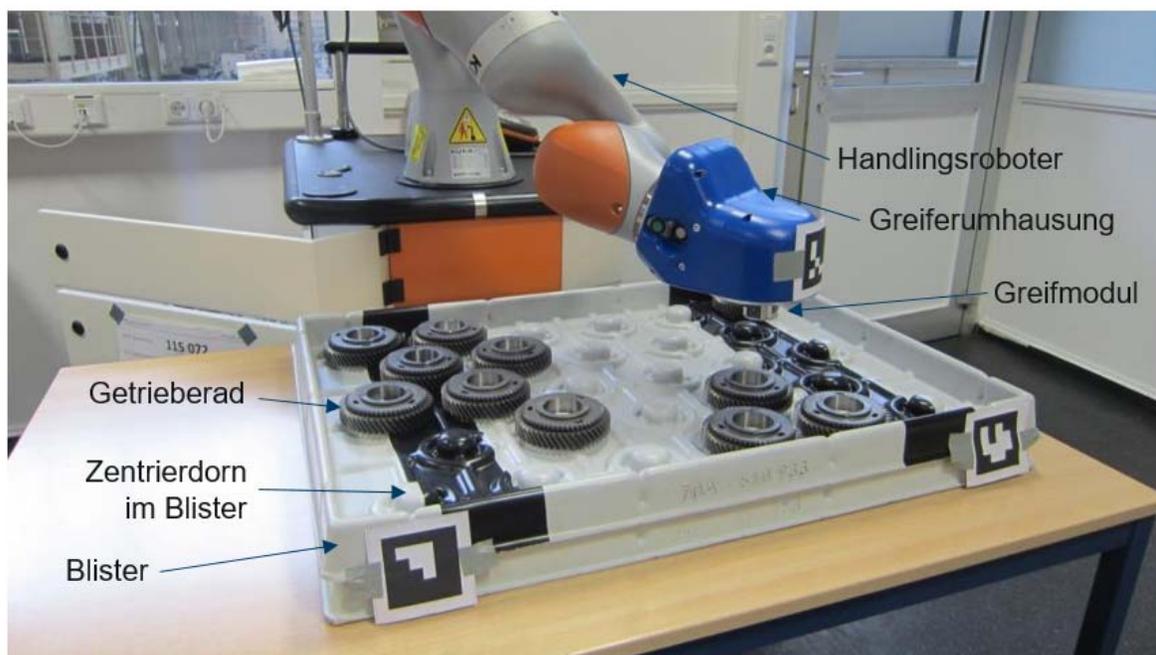


Abbildung 30: Vorversuch 1 – Aufbau der Handlingsapplikation

¹⁴ Verpackung für Bauteile; Kunststofftiefziehfolie

¹⁵ Die Installation eines Verkettungsbands im Versuchsraum wäre sehr aufwendig und das Bereitlegen eines Rades durch eine weitere Person auf einer Palette würde ungewollte zusätzliche Reaktionen des Probanden hervorrufen.

Die Bahnplanung des Roboters ist derart eingerichtet, dass zwischen allen Punkten eine Home-Position, etwa 40 cm oberhalb des Blisters, angefahren wird. Somit ist für den Probanden eine deutlichere Roboterbewegung erkennbar als in der Serienumgebung mit optimaler Bahnplanung.

Der Roboter verfährt während des Versuchs in einer reduzierten Geschwindigkeit. Weiterhin ist eine Abschaltung des Roboters bei Überschreitung von 250 mm/s, der sicheren reduzierten Geschwindigkeit (DIN EN 775), eingerichtet. Für den Prozess des Aufnehmens und Ablegens wird die Geschwindigkeit nochmals reduziert, sodass beim Aufnehmen eine maximale Kraft von 10 N und beim Ablegen von 20 N am Endeffektor des Roboters eingehalten wird. Die Umschaltung auf diesen besonders sensitiven Bewegungsabschnitt erfolgt durch das Anfahren eines Wegpunkts, ca. 40 mm oberhalb der jeweiligen Ablagepositionen. Von diesen Wegpunkten fährt der Roboter senkrecht nach unten bis der erwartete Kontakt mit einem Blisterdorn, der Zentrierung für die Getrieberäder im Blister (siehe Abbildung 31), auftritt. Werden die Kontaktkräfte erreicht bevor der Wegpunkt des Blisterdorns erkannt wurde, stoppt der Roboter seine Bewegung und fährt in die entgegengesetzte Richtung frei.

Der Proband erhält einen Bildschirm- bzw. Schreibeplatz ohne direkte Interaktion mit dem Roboter, jedoch in direkter Nähe zu ihm (siehe Abbildung 31). Dieser Aufbau mit einer Kernaufgabe ohne Roboterinteraktion und einer kognitiven Anforderung (Beobachtung / Ablenkung) durch den Roboter ist eine realistische Simulation des Einsatzes von schutzzaunlosen Robotern in einer mechanischen Fertigung (vgl. Koppenborg et al., 2013, S. 418).

Vorversuch 1 wird mit zwei Probanden durchgeführt, die bereits Erfahrungen mit klassischen Robotern aufweisen. Der Bewegungsablauf und die Sicherheitsfunktionen des kooperierenden Roboters werden den Probanden im Vorfeld des Versuchs erläutert, ebenso die Funktionsweise des Eye-Tracking Systems. Die Probanden füllen zunächst den ersten Teil des Fragebogens aus, danach beginnt die Verkabelung und Kalibrierung der Kameras.

Der Vorversuch wird in drei Stufen durchgeführt. Der Roboter steht zunächst im direkten Blickfeld des Probanden, der Roboterfuß befindet sich in ca. 2,60 m Entfernung zu ihm (Pos. 1a).

Folglich und bedingt durch die Länge des Roboterarmes von 80 cm beträgt der Mindestabstand von Roboter zu Proband 1,80 m (sozialer Bereich). Im zweiten Durchlauf wird der Proband näher an den Roboter herangesetzt, die Entfernung zum Roboterfuß beträgt nun 1,80 m, der minimale Abstand liegt bei 1,00 m (Pos. 1c). Der Roboter tritt somit in den persönlichen Distanzbereich (von ca. 0,45 m bis ca. 1,20 m) des Probanden ein. Im dritten Durchlauf wird die Entfernung von 1,80 m ab Roboterfuß beibehalten, der Proband jedoch in einen ca. 60° Winkel zum Roboter versetzt (Pos. 3c), wodurch sich der Roboter im peripheren Blickfeld des Probanden bewegt.

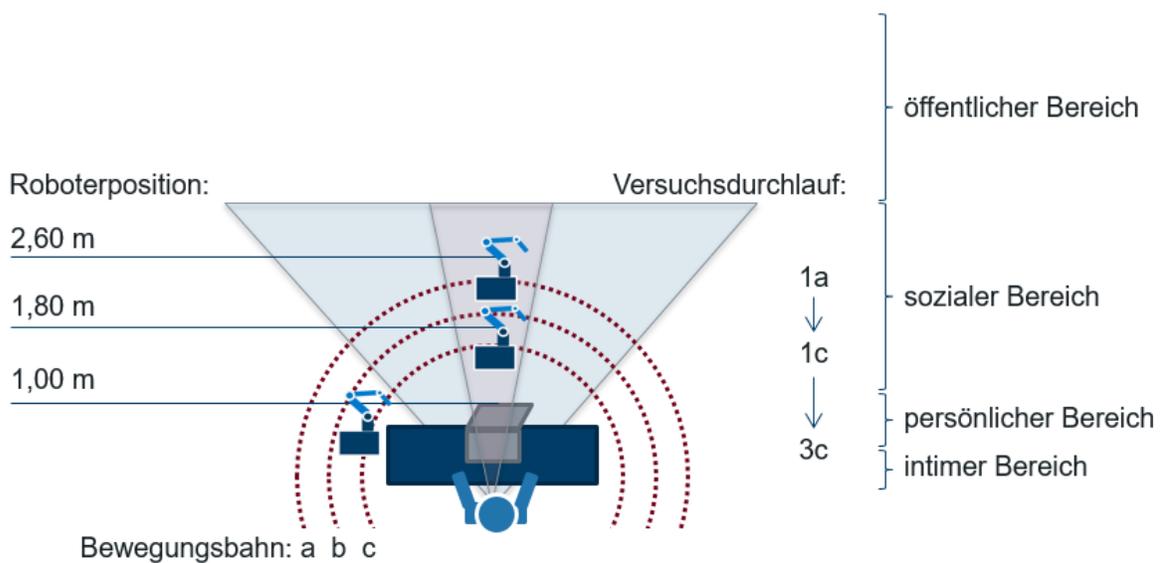


Abbildung 31: Vorversuch 1 – Ablaufskizze

Nach dem Einrichten des Versuchsplatzes und der Prüfung des Kamerasystems wird der Roboter gestartet. Die Länge der einzelnen Durchläufe entspricht je einem vollständigen Ablauf des Roboterprogramms und dauert jeweils etwa 10 Minuten.

Nach den drei Durchläufen füllen die Probanden den zweiten, versuchsspezifischen Teil des Fragebogens aus.

Beobachtung

Die Probanden gehen aufgeschlossen mit der Untersuchung um, einem Probanden ist das Verfahren des Eye-Tracking bereits bekannt. Sie zeigen geringe

Ablenkungsreaktionen, die Konzentration auf den Bildschirm sowie den Arbeitsplatz fällt ihnen leicht.

Ein Proband merkt nach dem Versuch an, dass er die akustischen Geräusche des Roboters deutlicher wahrnahm als die visuellen Merkmale. Der Greifer des Roboters wird mit Druckluft betrieben. Im stillen Besprechungsraum ist das Auf- und Abschalten des Druckluftventils gut zu hören. Ebenso ist ein „metallisches“ Geräusch hörbar, wenn die Greiferbacken gegen das Innere des Rades stoßen. Der reale Versuchsaufbau wird in Abbildung 32 dargestellt.



Abbildung 32: Vorversuch 1 – Proband während des Vorversuchs in Position 3c

Auswertung des Vorversuchs

Für die Auswertung der Blickbewegungsdaten wird die Software D-Lab 2.1 verwendet. Nachdem die automatische Markersuche abgeschlossen ist, werden die relevanten Aufmerksamkeitsbereiche (Areas of Interest) gegliedert. In diesem Vorversuch sind dies der Notebookbildschirm, die Notebooktastatur und der Bereich des Roboters inkl. des Blisters, siehe Anhang 4.

Daraufhin werden die softwareseitig untergliederten Bereiche untersucht und geprüft. Besonders werden die Zeitintervalle betrachtet, in denen AOI-übergreifende Sakkaden stattfinden. In diesen Sequenzen stellt sich die automatische Zuordnung der Software

häufig als fehlerhaft heraus, da das System aufgrund der kabellosen, ungenügenden Bildqualität die Marker nicht sicher erkennt. Die statische Zuordnung der Bereiche ist daher nicht zuverlässig und wird einzeln manuell nachgeprüft.

Dazu wird jede Fixation in einem Bereich und jede Sakkade, die einen Bereich wechselt nochmals manuell pro Bild überprüft. Zusätzlich werden auch die Intervalle besonders geprüft, die keiner Area of Interest zugeordnet werden und in denen keine Pupille erkannt wird.

Die Darstellung der Blickbereiche erfolgt zunächst anhand der gemittelten Werte jedes Durchlaufs in einem Kreisdiagramm (Abbildung 33).

Über die drei Versuchspositionen hinweg nimmt die Konzentration auf den Arbeitsbereich von ca. 89% auf ca. 80% ab. Die Fixationen auf den Roboter liegen im ersten Durchlauf bei 0% und steigen im zweiten Durchlauf auf ca. 2% an. Dieser Wert erhöht sich zum dritten Durchlauf hin nicht.

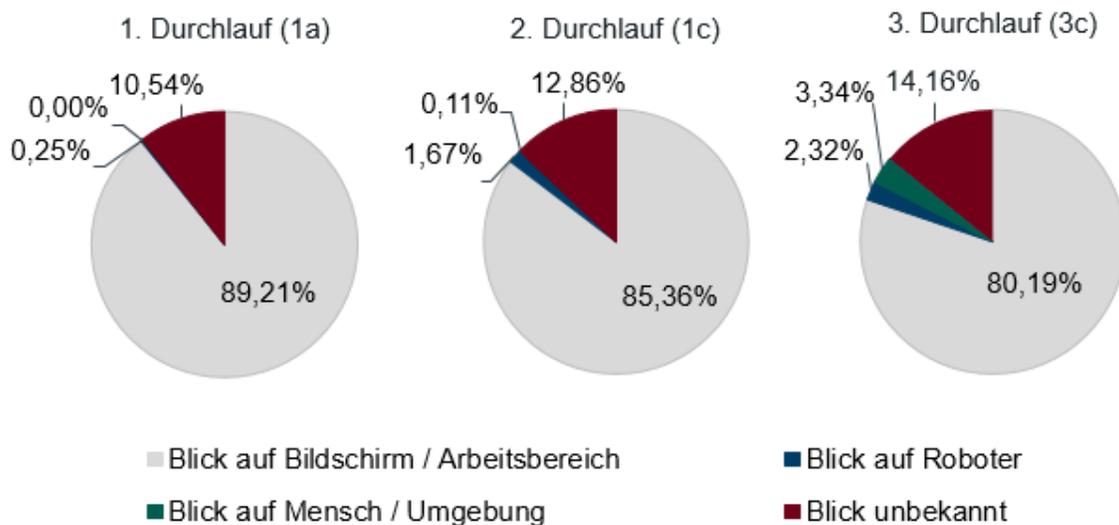


Abbildung 33: Vorversuch 1 – Zuordnung der Fixationen auf die AOs

Obwohl der anteilige Fixationszeitraum auf den Roboter zwischen dem zweiten und dritten Durchlauf identisch ist, verändert sich die Anzahl der Sakkaden in den Bereich des Roboters.

Für eine Effektermittlung ist an dieser Stelle die getrennte Begutachtung der Probanden erforderlich, da die Häufigkeiten der Sakkaden stark variieren. Während der erste Proband im Mittel ca. 2,2 Sakkaden/Minute aufweist, sind dies bei Proband 2 nur

ca. 0,5 Sakkaden/Minute. Die Häufigkeit der Sakkaden in den Bereich des Roboters wird für beide Probanden als sehr gering eingeschätzt.

Weiterhin steigt die Häufigkeit der Sakkaden nach unterschiedlichen Mustern an. Bei Proband 1 ist die Anzahl der Sprünge zwischen den AOs in den ersten beiden Durchläufen nahezu identisch und steigt zum dritten Durchlauf deutlich an. Bei Proband 2 findet der Anstieg bereits bei dem zweiten Durchlauf statt und erhöht sich zum dritten Durchlauf nur noch minimal. Proband 1 reagiert erst auf die Bewegung des Roboters im peripheren Sehbereich, während eine sensible Reaktion bei Proband 2 bereits bei der Reduzierung der Entfernung zum Roboter und dessen Eintritt in den privaten Distanzbereich auftritt. Dieser Effekt wird in Abbildung 34 für die beiden Probanden in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

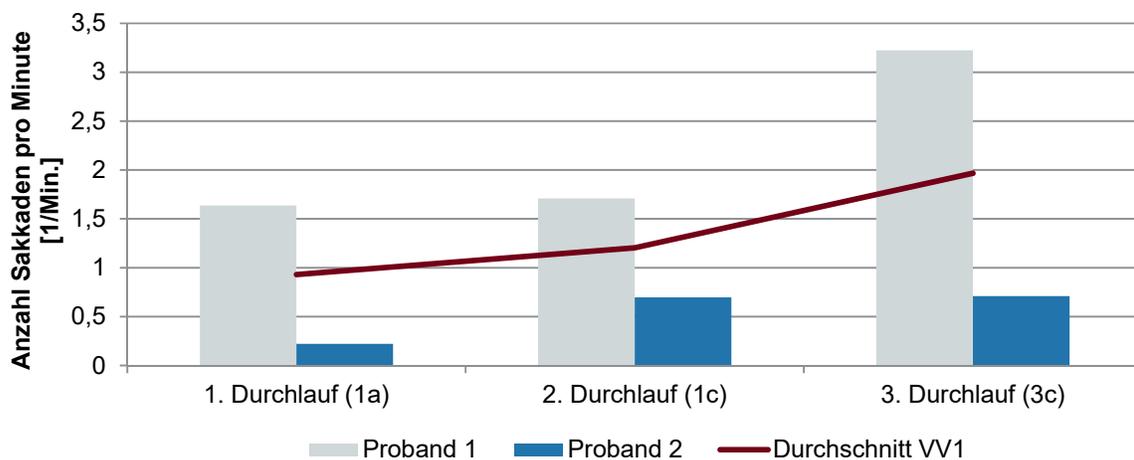


Abbildung 34: Vorversuch 1 – Anzahl Sakkaden pro Minute von Proband 1 und 2

Die Kurve des Mittelwertes zeigt eine kontinuierliche Zunahme der Sakkaden in den Roboterbereich entsprechend der Hypothesen. Im Durchschnitt findet sowohl bei einer Reduzierung des Abstands zwischen Mensch und Roboter (1c) eine erhöhte Blickbewegung statt als auch bei einer Verlagerung der Roboterposition (3c) in den peripheren Blickbereich.

Durch diesen erstmaligen Versuch der Variation von Entfernung und Winkel zwischen einem Menschen und einem kooperierenden Roboter unter objektiven Messverfahren wird die vergleichende Betrachtung dieser Charakteristiken möglich. Durch die Reduzierung des Abstands um 80 cm zwischen Proband und Roboter erhöht sich die

Anzahl der Sakkaden um durchschnittlich ca. 29%. Die Veränderung des Winkels von 0° auf 60° zwischen Proband und Roboter bewirkt durchschnittlich sogar eine Erhöhung der Anzahl der Sakkaden um ca. 63%.

Diskussion und Zusammenfassung

Dieser erste Vorversuch zeigt die Ablenkung eines Menschen durch einen Roboter anhand objektiv gemessener Werte. Der im peripheren Bereich bewegte Roboter bewirkt eine deutlich stärkere Zunahme der Sakkaden (Faktor 2) als dies bei Verkürzung der Entfernung zwischen Mensch und Roboter der Fall ist.

Während der drei Versuchsreihen liegt der Anteil der nicht erkannten Pupillendaten bei ca. 10 - 14%. Für diese sporadische Nichterkennung wird von einer gleichen Verteilung der Blickdaten ausgegangen.

Die geringe Eye-Validity lässt sich auf die Kameratechnik und die Funkübertragung vom Kamerasender zum Empfängergerät zurückführen, die sich in der produktionsnahen Umgebung als nicht besonders stabil herausstellt. Um in den folgenden Versuchen eine zuverlässigere Auswertung zu erreichen, soll ein weiteres Eye-Tracking System mit hochauflösender Kamera und Kabelverbindung verwendet werden.

4.1.2 Voruntersuchung 2 – Entfernungsvariation in der Z-Ebene

In Vorversuch 2 soll die neuere Kameratechnik von Pupil Labs erstmals angewandt und die Untersuchung aus Vorversuch 1 ergänzt werden.

In Vorversuch 1 wurden die Auswirkung der Entfernung und des Winkels zwischen Mensch und Roboter ermittelt, wobei die Variation in einer flachen Ebene (X- und Y-Koordinaten) betrachtet wurde, siehe Abbildung 31 auf S. 92.

Hypothesen zur Voruntersuchung

Vorversuch 2 differenziert diesen Abstand in die dritte Ebene, also verschiedene Abstände zwischen den Kooperationspartnern in der Z-Ebene (Abbildung 35). Für diese Betrachtung wird davon ausgegangen, dass der Mensch seinen persönlichen Schutzbereich von den Augen, d. h. dem Kopfbereich aus, aufbaut. Dementsprechend

wird auch ein Abstand zu einem Objekt, wie dem Versuchsroboter vom Kopfbereich aus wahrgenommen:

Schutzbereich

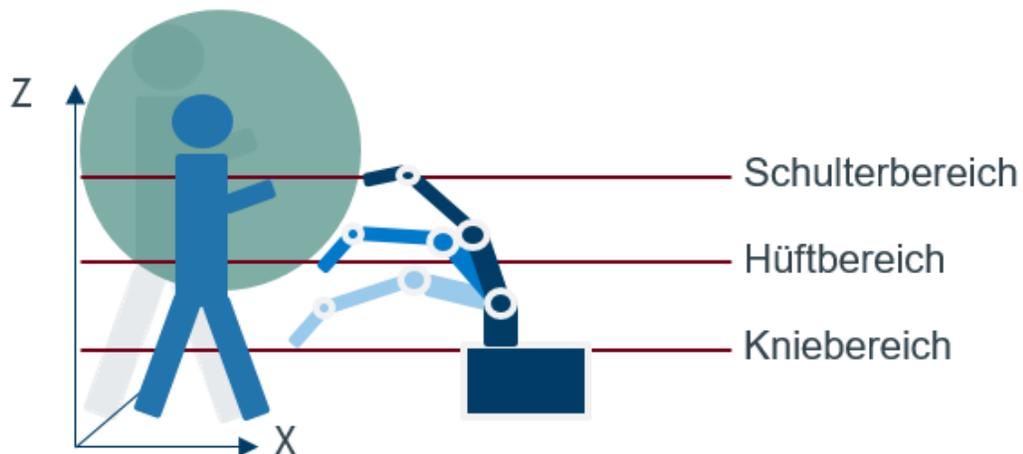


Abbildung 35: Vorversuch 2 – Skizzierter Aufbau

Demnach nimmt eine große Person subjektiv einen größeren Abstand zum Roboter wahr, eine kleinere Person entsprechend einen kleineren Abstand. Das Komfortempfinden des Menschen wäre demnach abhängig von der Körpergröße des interagierenden Menschen und seinem Bewegungsverhalten. Der Einfluss der Z-Koordinate könnte sich durch die Verlegung der Roboterbahn in einen niedrigeren Bereich reduzieren lassen. Dies würde die Beanspruchung des Menschen möglicherweise mit geringem Aufwand reduzieren. In der Literatur wird dieser Aspekt bisher nicht aufgegriffen.

Vorversuch 2 soll daher die Reaktionen der Probanden von Roboterbahnen in unterschiedlichen Z-Ebenen ermitteln:

VH2.1: Die Reaktion der Probanden fällt bei kleiner werdendem Z-Abstand stärker aus.

Versuchsdesign und -durchführung

Der Vorversuch 2 findet unter ähnlichen Umgebungsvoraussetzungen wie Vorversuch 1 statt. Der Roboter wird frontal vor den Probanden gestellt, wobei der geringste Abstand zum Manipulator ca. 80 cm beträgt. Der Roboter befindet sich somit während des kompletten Versuchs im persönlichen Distanzbereich des Probanden. Im Unterschied zu

Vorversuch 1 stehen die Probanden während der Untersuchung und werden nicht mehr durch den Schreibtisch als „Schutzbarriere“ von dem Roboter getrennt.

Für diesen Versuchsdurchlauf wird die Bewegungsbahn des Roboters stark vereinfacht ausgeführt. Der Roboter fährt lediglich zwei leicht versetzte horizontale Bahnen auf einer jeweils fest definierten Z-Ebene ab. Dabei bewegt sich der Roboter quer zum Probanden. Der Ablauf des Versuchsteils wird wieder in drei Teilabschnitte untergliedert, in denen sich der Roboter im Bereich des Knies, der Hüfte und des Schulterbereichs bewegt. Die Probanden werden für diesen Versuch derart ausgewählt, dass sie annähernd eine Körpergröße von ca. 1,80 m (1,78-1,81 m) aufweisen. Die Versuchsreihe beginnt in der unteren Bewegungsebene mit den vermutlich geringsten Reaktionen der Probanden und endet mit dem Schulterbereich. Analog zu Vorversuch 1 wird von einer Verstärkung der Reaktionen über die Versuchsreihe hinweg ausgegangen, welche die geringeren Gewöhnungseffekte übersteigen.

Die Probanden sollen sich in diesem Versuch auf einen Fixpunkt konzentrieren. Als Fixpunkt wird die blaue Statuslampe an der Roboterplattform ausgewählt, analog Thiernemann (2005, S. 77). Von diesem Fixpunkt aus werden die Sakkaden in andere AOIs aufgezeichnet. Der Versuch findet wieder mit zwei Probanden statt und dauert je Durchlauf ca. 30 Sekunden.

Beobachtung

Bei der Durchführung des Versuchs fällt auf, dass zwei Bereiche des Roboters besonders häufig fokussiert werden. Dies ist zum einen der Greifer, der sich im geringsten Abstand zu den Probanden befindet und zum anderen der oberste Punkt des Roboterarms. Aufgrund der Bahnbewegung des Roboters stellt die vierte Achse (Abbildung 36) meist den höchsten Punkt des Roboters dar, der sich auch bei einer niedrigen Roboterbahn regelmäßig in dem Blickfeld des Probanden befindet.

Erwartungsgemäß befindet sich der Roboter in der unteren Ebene größtenteils außerhalb des Blickfelds des Probanden. Mehrfach wird jedoch bereits bei leichtem Eintreten des Roboters durch die Achse vier in den direkten Blickbereich des Probanden eine Sakkade aufgezeichnet.

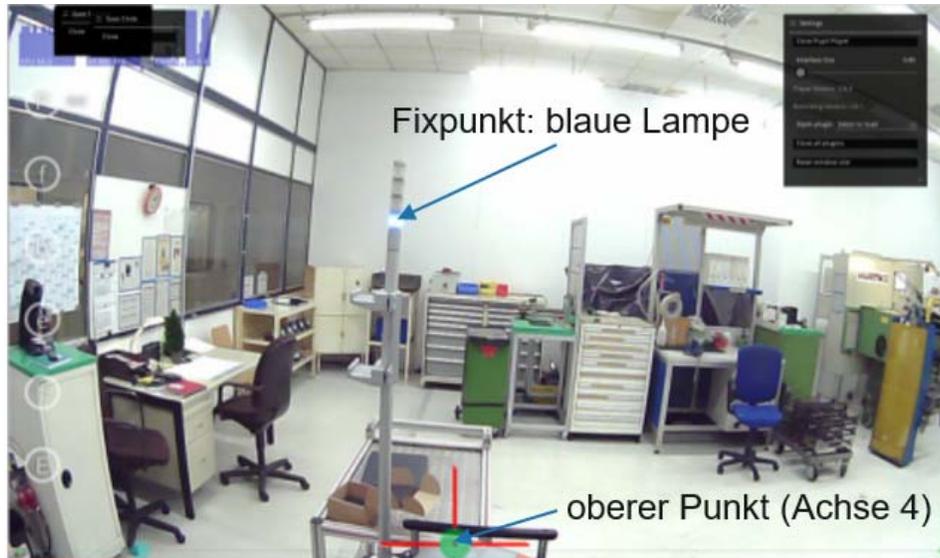


Abbildung 36: Blickfeld d. Probanden – Roboters in der untersten Bewegungsebene

Wird der Roboter in den weiteren Durchläufen auf eine höhere Ebene versetzt, dringt er mit größerer Häufigkeit in den direkten Blickbereich des Probanden ein, siehe Abbildung 37.

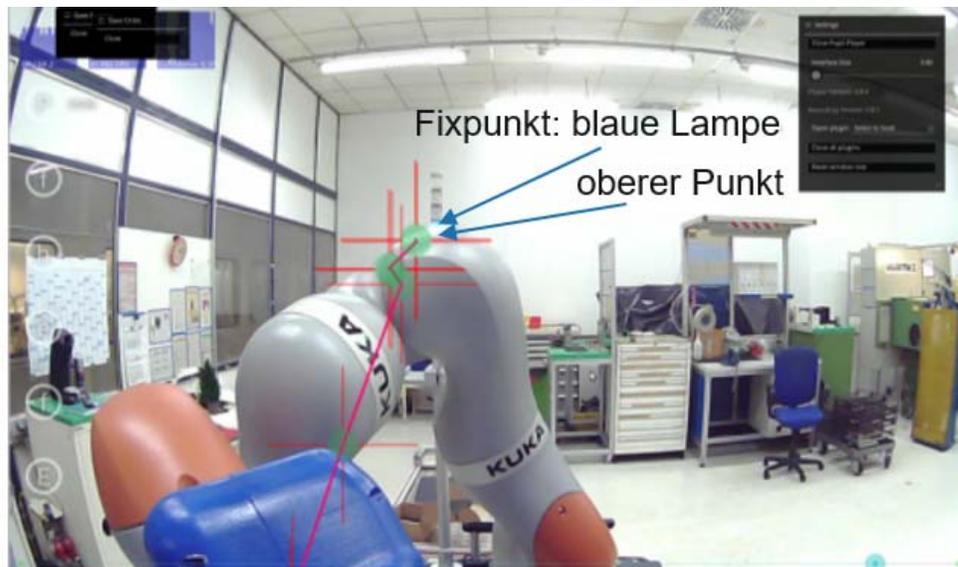


Abbildung 37: Blickfeld d. Probanden – Roboter in der obersten Bewegungsebene

Auswertung

Zunächst werden die einzelnen Videodateien und die exportierten Daten verglichen und den Wegabschnitten der Roboterbahn zugeordnet. Um eine übersichtliche Auswertung zu ermöglichen, werden nur drei Areas of Interest definiert.

Diese AOIs sind der Roboter, die blaue Lampe als Fixpunkt und Sonstiges.

Im Vergleich zu Vorversuch 1 weisen die Probanden in Vorversuch 2 ähnliche Werte und Muster auf. In den nachfolgenden drei Grafiken sind daher den einzelnen AOIs über der Zeit (60 Frames pro Sekunde) die Fixationen zugeordnet. Die Grafiken zeigen beispielhaft die Werte eines Probanden. Für die Darstellung werden Balkendiagramme gewählt. Als ein AOI wird die blaue Statuslampe gewählt, die von den Probanden fokussiert werden soll. Die beiden weiteren AOIs, der Roboter und Sonstiges sind entsprechend als Ablenkungen des Referenzpunkts „blaue Lampe“ zu betrachten. In der unteren Ebene des Roboters (Abbildung 38), der Knieebene, liegen drei Sakkaden auf den Roboter vor.

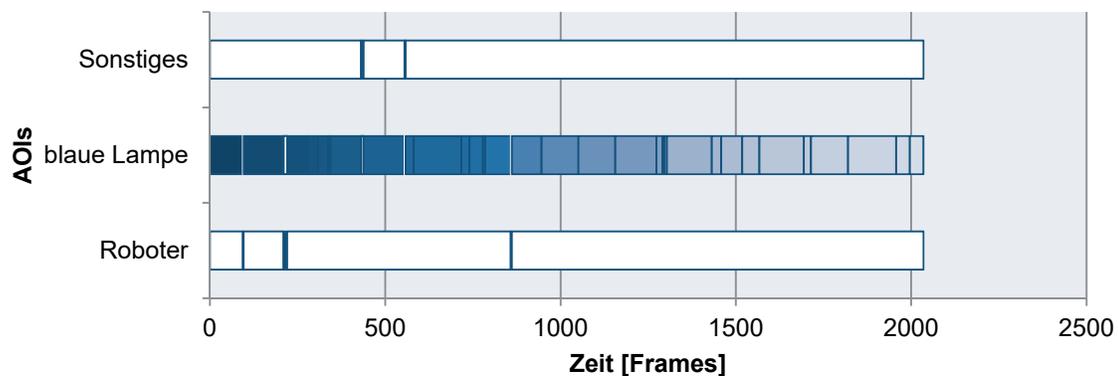


Abbildung 38: Vorversuch 2 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Kniebereich

In der mittleren Bewegungsebene des Roboters steigt die Anzahl der Blicksprünge auf den Roboter um 4 Sakkaden auf insgesamt 7 Sakkaden an, siehe Abbildung 39.

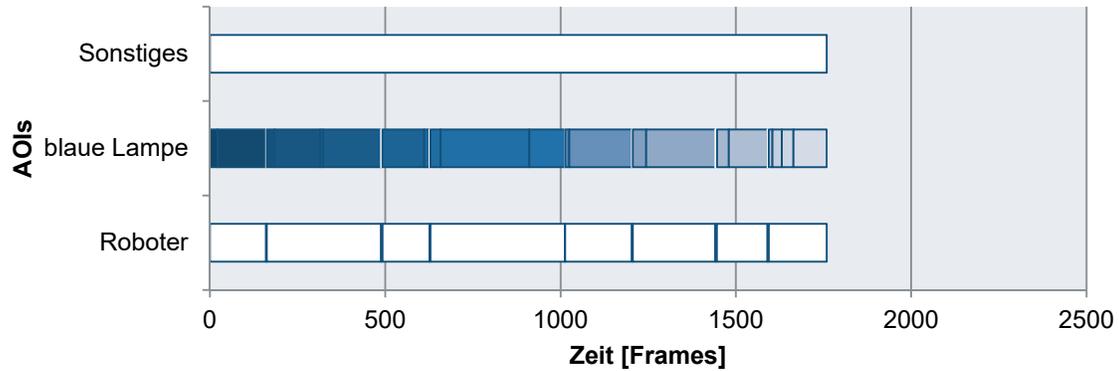


Abbildung 39: Vorversuch 2 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Hüftbereich

Der obere Bereich der Schulterebene weist nur eine leichte Erhöhung der Sakkaden, im Vergleich zur mittleren Bewegungsebene, auf (Abbildung 40). Die Anzahl der Sakkaden in der oberen Bewegungsebene liegt bei dem beispielhaften Probanden bei insgesamt 8 Sakkaden in den Roboterbereich.



Abbildung 40: Vorversuch 2 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Schulterbereich

Die detaillierte Auswertung und Diskussion des Vorversuchs 2 wird zusammen mit Vorversuch 3 im nächsten Abschnitt 4.1.3 durchgeführt, da die nächste Voruntersuchung im direkten Zusammenhang zu Voruntersuchung 2 steht.

4.1.3 Voruntersuchung 3 – Reduzierte Entfernungsvariation in der Z-Ebene

In Voruntersuchung 3 soll der Vorversuch 2 weiter detailliert und minimal variiert werden, um zusätzliche Aussagen über die These des Einflusses der Z-Ebene ableiten zu

können. Hierzu soll der Vorversuch 2 mit noch geringerem Abstand zwischen Mensch und Roboter wiederholt werden.

Hypothesen zur Voruntersuchung

Durch die Reduzierung des Abstands zwischen Mensch und Roboter verstärkt sich die Ablenkung im Vergleich zu Vorversuch 2.

VH3.1: Die Reduzierung des Abstands von VV2 zu VV3 bewirkt eine Zunahme von Sakkaden und eine gesteigerte Ablenkung. Dies gilt nur für die Ebenen, in denen der Roboter sich im direkten Blickfeld der Probanden befindet.

Versuchsdesign und –durchführung

Für die Voruntersuchung 3 wird das Versuchsdesign von Vorversuch 2 weiterverwendet, wobei der minimale Abstand zwischen Proband und Roboter von 80 cm auf 10 cm reduziert wird (Abbildung 41). Der Roboter befindet sich somit während des Versuchs im intimen Distanzbereich der Probanden, der persönliche Schutzbereich ist damit deutlich reduziert (vergleiche Abbildung 35 auf S. 97). Dieser Vorversuch wird mit drei Probanden durchgeführt.

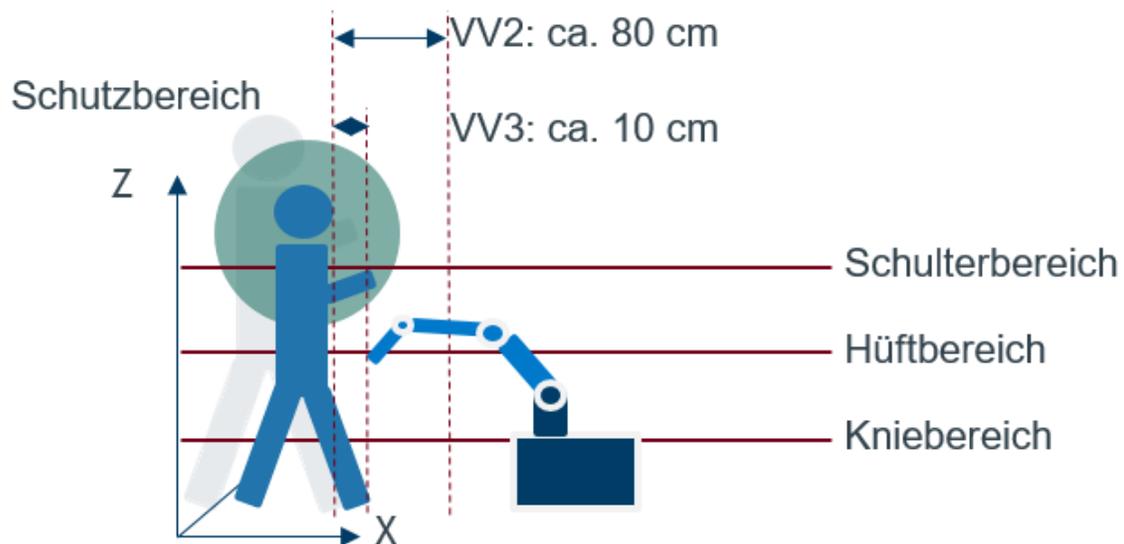


Abbildung 41: Vorversuch 3 – Versuchsskizze

Beobachtung

Die geringe Distanz zwischen Mensch und Roboter wirkt sich im unteren Bereich (Knie-Ebene) wenig aus, denn der Roboter befindet sich nur teilweise im Blickfeld des Probanden. In den beiden oberen Bereichen wirkt die Konstellation des Versuchs nahezu bedrohlich auf den Probanden, denn der Roboter befindet sich in seinem direkten Blickfeld bzw. sogar direkt vor dem Kopf des Probanden.

Auswertung

In den nachfolgenden drei Abbildungen sind den einzelnen Areas of Interest über die Zeit (in 60 Frames pro Sekunde) die entsprechenden Fixationszeiträume zugeordnet. Die Darstellung erfolgt analog zur Auswertung von Vorversuch 2 und zeigt exemplarisch die einzelnen Verläufe für die verschiedenen Z-Ebenen eines Probanden.

In der unteren Ebene zeigt Proband 6 keine Fixation auf den Roboter. Der Durchschnitt liegt bei ca. 4,3 Fixationen (3 Probanden) auf den Roboter in der Knieebene. Ebenso lässt sich der Proband nicht von der Umgebung ablenken und fixiert über den kompletten Durchgang hinweg erfolgreich den Fixpunkt, siehe Abbildung 42.

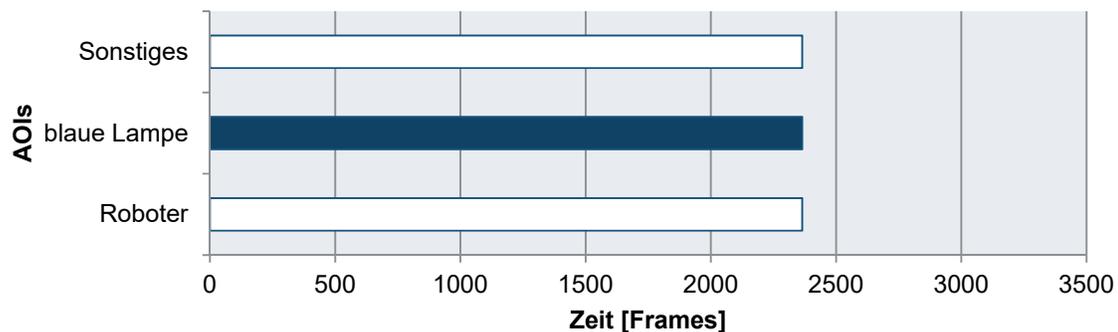


Abbildung 42: Vorversuch 3 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Kniebereich

Der geringe Ablenkungswert in der unteren Ebene steigt zur mittleren Ebene an (Abbildung 43). Der Proband zeigt in der mittleren Roboterposition 13 Fixationen auf den Roboter. Ebenso, wie in der unteren Bewegungsebene finden keine Sakkaden in die Umgebung des Versuchsraums statt.

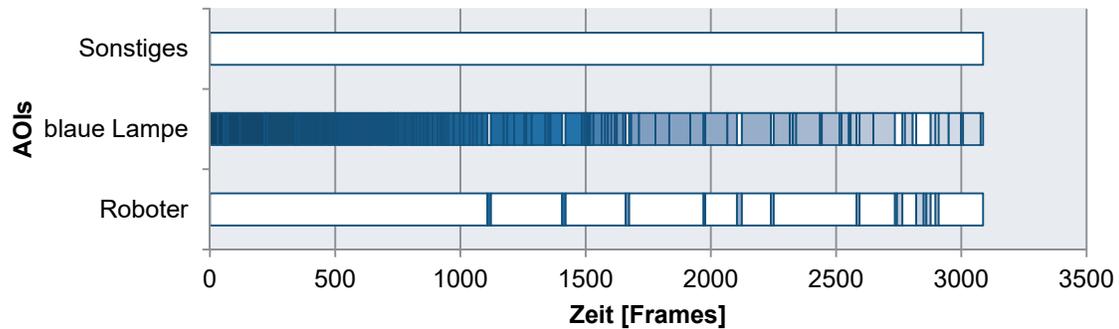


Abbildung 43: Vorversuch 3 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Hüftbereich

Im oberen Bereich, in dem sich der Roboter auf Schulterebene direkt vor dem Kopf des Probanden befindet, liegt die Anzahl der Sakkaden auf den Roboter bei 37. Mit dieser gesteigerten Unruhe gehen die ersten Sakkaden in die Umgebung (Sonstiges) einher, siehe Abbildung 44.

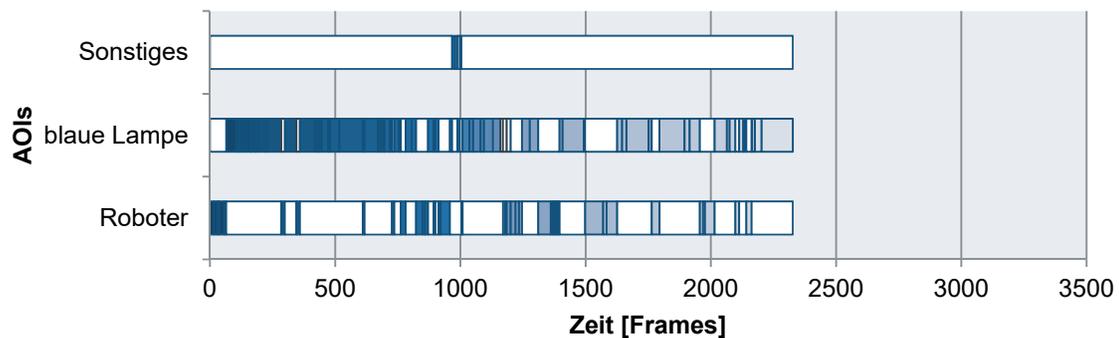


Abbildung 44: Vorversuch 3 – Zuordnung Fixationen nach AOIs: Schulterbereich

Die einzelnen Graphen zeigen über die steigende Z-Ebene eine deutliche Zunahme der Sakkaden und Fixationen in den Bereich des Roboters.

Auswertung von Vorversuch 2 und 3

Vorversuch 2 und 3 werden mit gleichem Versuchsdesign durchgeführt, wobei sich der Abstand zum Roboter von Versuch 2 auf 3 von 80 cm auf 10 cm reduziert. Die einzelnen Roboterpositionen sind in Abbildung 45 schematisch als Punkte (blau: VV3, rot: VV2) dargestellt.

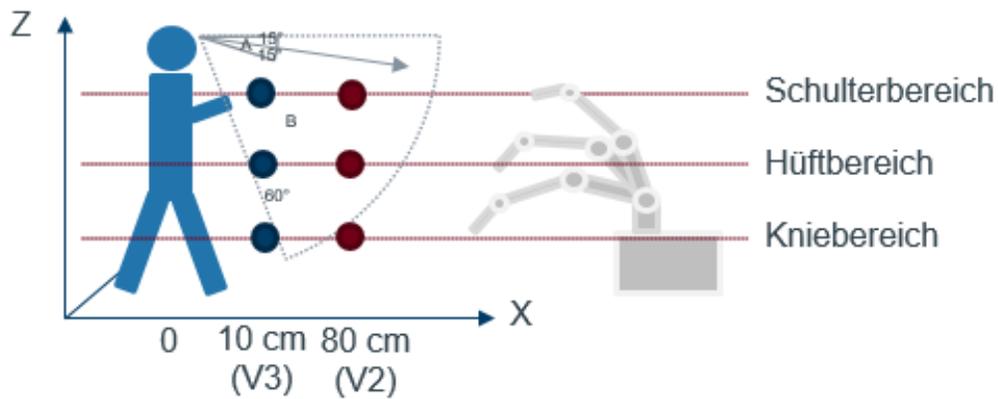


Abbildung 45: Vorversuch 2 + 3 – Versuchsdesign im Vergleich

In beiden Versuchsteilen befindet sich der Roboter in der oberen Ebene größtenteils im direkten Blickfeld der Probanden. Die Sakkaden springen hierbei hauptsächlich auf die Achse 4 des Roboters, insbesondere, wenn diese sich in direkter Nähe zum Fixpunkt befindet (siehe Abbildung 37 auf S. 99). Weiterhin wird der Greifer häufig wahrgenommen, sobald dieser in das Blickfeld der Probanden eindringt.

In Abbildung 46 sind für die einzelnen Z-Ebenen die aufsummierten Fixationszeiträume der Vorversuche 2 und 3 dargestellt. Hieraus geht hervor, dass der zeitliche Anteil der Aufmerksamkeit, der auf den Roboter gerichtet ist, über die aufsteigenden Z-Ebenen ansteigt. Der Anteil, der auf den Fixpunkt gerichtet ist, hingegen sinkt. In Vorversuch 2 liegt dieser Trend nur in geringer Ausprägung vor, die durchschnittliche Fixationszeit steigt von der unteren auf die obere Ebene von 2,5 Frames auf ca. 4,3 Frames an. In Versuch 3 steigt die auf den Roboter gerichtete Zeit durchschnittlich von ca. 14,5 Frames auf ca. 36,5 Frames.

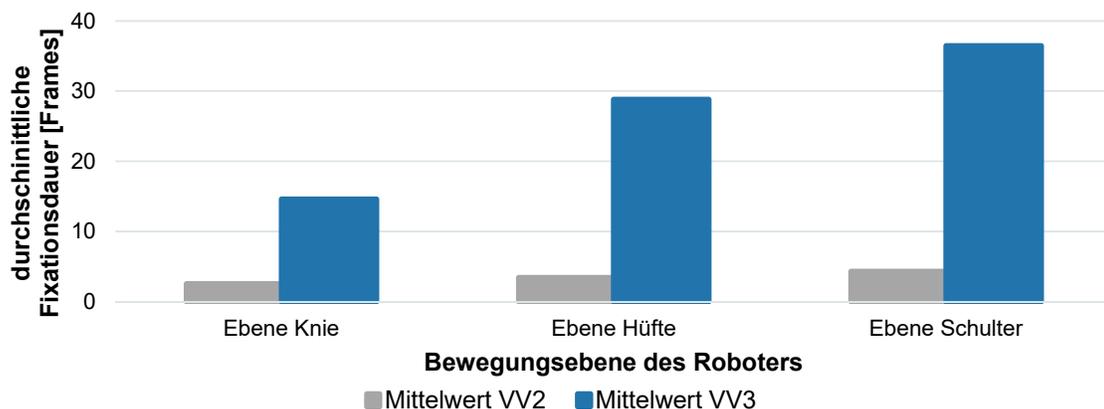


Abbildung 46: Vorversuch 2 + 3 – Fixationen auf den Roboter

Neben der Dauer der Fixationen ist auch die Häufigkeit, mit der der Roboter betrachtet wird, aussagekräftig. In Abbildung 47 sind, ebenfalls als Balkendiagramm, die Häufigkeit der Sakkaden in den Bereich des Roboters aufgetragen. Beide Versuchsreihen zeigen ansteigende Werte über die drei Versuchsdurchläufe (Bewegungsebenen).

Die Werte des Vorversuchs 3 befinden sich bereits zu Beginn auf einem etwas höheren Niveau (4,3 zu 1,5 Sakkaden) und unterliegen im Verlauf der drei Durchläufe einer deutlicheren Steigung als bei Vorversuch 2. Die Steigerung der Sakkaden von der unteren zur mittleren Bewegungsebene ist deutlich geringer als die Steigerung der Sakkaden von der mittleren zur höheren Bewegungsebene. Dies trifft auf Vorversuch 2 und 3 zu.

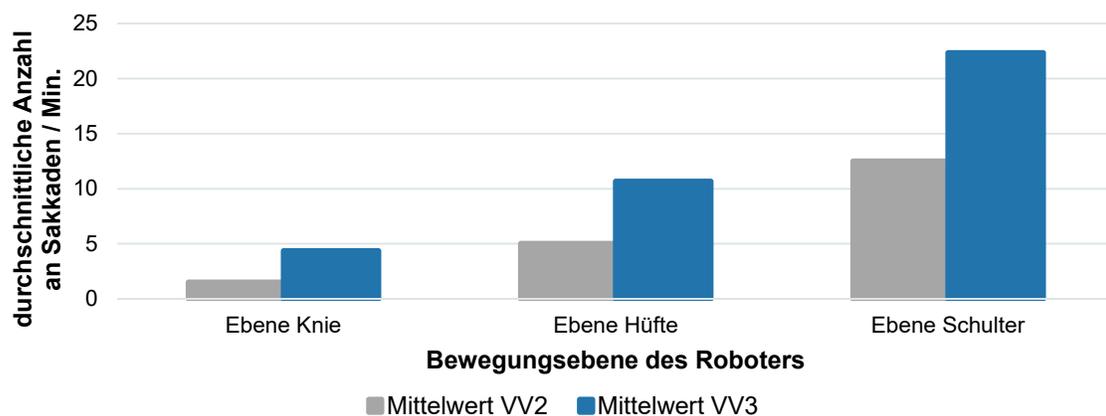


Abbildung 47: Vorversuch 2 + 3 – Häufigkeit der Sakkaden auf den Roboter

Im Bereich des Knies zeigt sich, dass jeweils ein Proband aus beiden Versuchen keine Sakkaden zum Roboter aufwies.

In Abbildung 48 und Abbildung 49 wird die Betrachtung auf alle AOIs erweitert. Der Graph des Kniebereichs zeigt in beiden Vorversuchen die höchste Konzentration auf den Fixpunkt und die geringste Fixationsdauer auf den Roboter. Der Schulterbereich zeigt eine exakt umgekehrte Priorisierung der Fixationen. Der Graph des Hüftbereichs liegt zwischen Knie- und Schulterbereich, jedoch näher an dem des Kniebereichs.

Bei einem Mindestabstand zum Roboter von 80 cm konnten die Probanden sich zu mindestens 95% auf den Fixpunkt (blaue Lampe) konzentrieren, nur im Bewegungsbereich der Schulterebene liegt eine nennenswerte Blickabweichung vor.

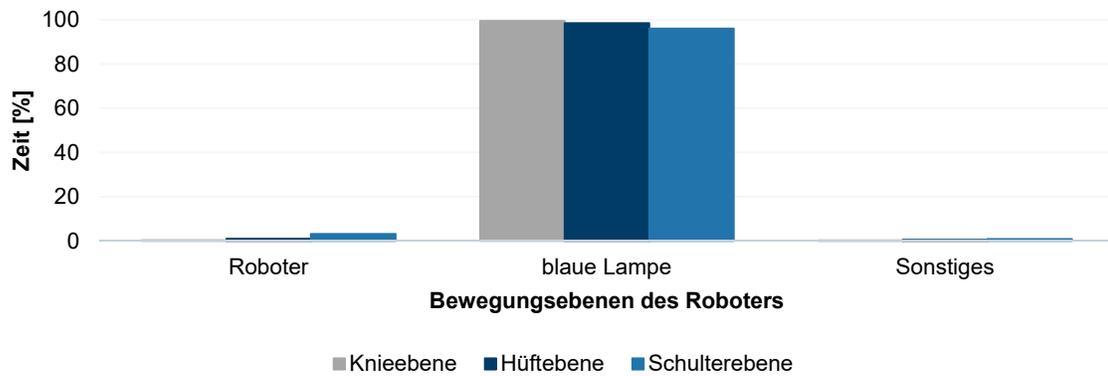


Abbildung 48: Vorversuch 2 – Zusammenfassung der Blickanteile nach AOs

Die Aufteilung der Blickanteile ist in Vorversuch 2 und 3 sehr ähnlich, wobei die Werte in Vorversuch 3 weiter auseinander liegen.

Die verkürzte Entfernung auf 10 cm zwischen Mensch und Roboter führt zu einer deutlichen Ablenkung vom Fixpunkt (blaue Lampe). Die Irritation ist umso größer je näher der Roboter an den Kopfbereich gelangt. Im Kniebereich liegt die Ablenkung bei ca. 4%, im Hüftbereich bei ca. 11% und im Schulterbereich bei ca. 30%. Daraus folgt, dass die Entfernung des Menschen zum Roboters in der Z-Ebene erheblichen Einfluss auf die Blickanteile und somit die Arbeitsleistung aufweist. Durch die Verkürzung der Entfernung in der Ebene wird der Effekt überproportional verstärkt.

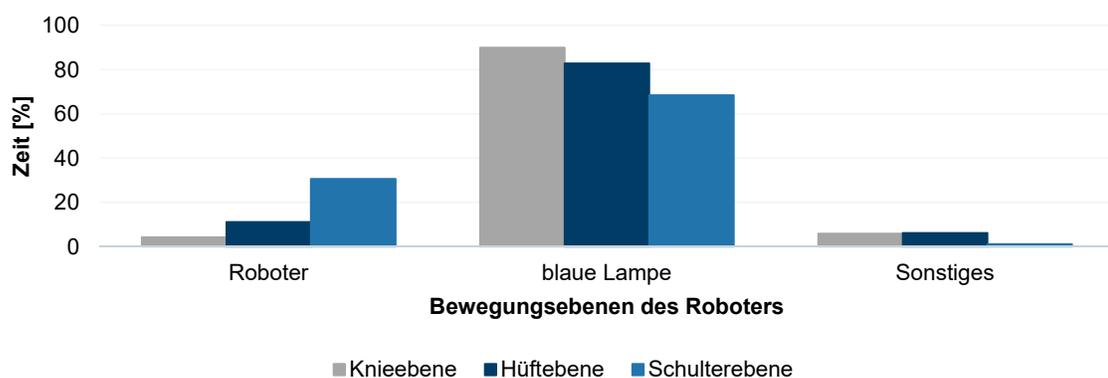


Abbildung 49: Vorversuch 3 – Zusammenfassung der Blickanteile nach AOs

Dies zeigt deutlich, dass die Entfernung des Roboters auch hinsichtlich der Z-Ebene zu berücksichtigen ist. Die Hypothesen VH2.1 und VH3.1 sind hiermit bestätigt.

Die Vorversuche 2 und 3 sind derart aufeinander abgestimmt, dass die Z-Ebene aus Versuch 2 annähernd denselben direkten Abstand zum Kopf des Probanden ausweist wie die jeweils niedrigere Z-Ebene in Vorversuch 3. Die Versuchspunkte mit denselben Entfernungen zum Kopf des Probanden sind in der nachfolgenden Abbildung 50 auf einer grau gestrichelten Kurve dargestellt.

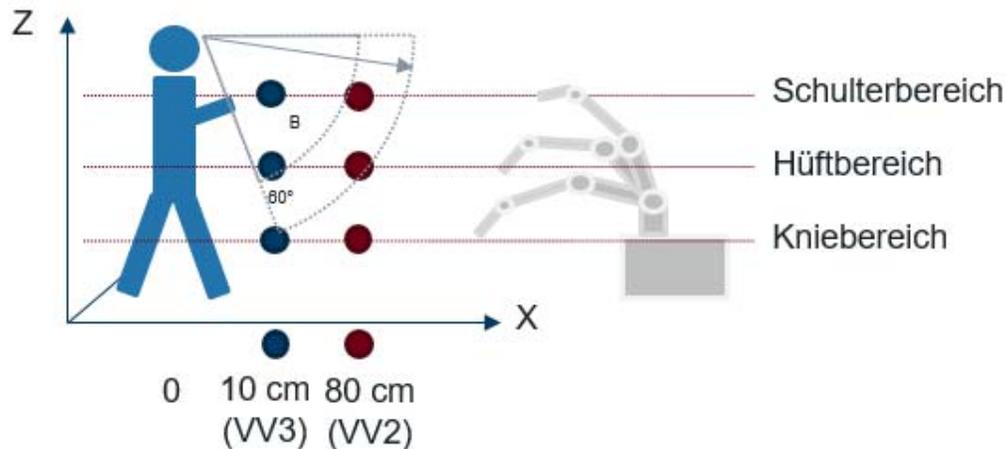


Abbildung 50: Vorversuch 2 + 3 – Direkter Abstand zum Kopf des Probanden

Bei einem Vergleich der entsprechenden Versuchswerte wird ersichtlich, dass bei gleichem direktem Abstand zum Kopf des Probanden die Werte aus Versuch 2 niedriger liegen, als die von Versuch 3. Dies bedeutet, dass Roboterbewegungen, die in der gleichen direkten Entfernung zum Kopf der Probanden verlaufen, unterschiedlich häufig fixiert werden. Die Roboterbewegung, die auf der X-Ebene näher und auf Z-Ebene weiter vom Probanden entfernt ist, wurde häufiger fixiert als die Roboterbewegung, die auf X-Ebene weiter und Z-Ebene näher verlief.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Nähe des Roboters zum Körper des Probanden einen stärkeren Einfluss als die Höhe und Entfernung nach Blickachse hat.

Bei der Betrachtung des Pupillendurchmessers fällt auf, dass dieser in VV3 deutlich geringer ist als in VV2.

Ein t-test zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ zeigt keine signifikanten Veränderungen des Pupillendurchmessers innerhalb der Vorversuche 2 und 3 (Abbildung 51).

Dies kann unter anderem auf die geringe Betrachtungsdauer zurückgeführt werden. Der Pupillendurchmesser wird daher erst in der zeitlich längeren Hauptuntersuchung wieder herangezogen.

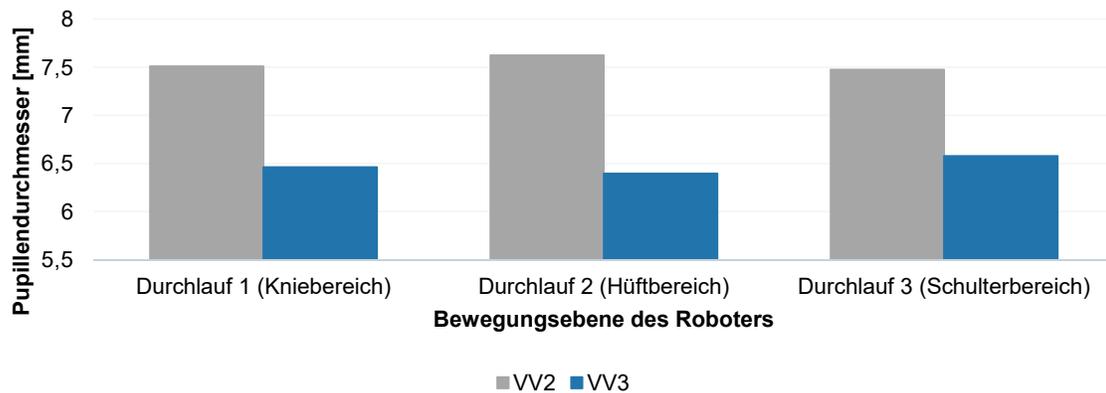


Abbildung 51: Vorversuch 2 + 3 – Durchschnittlicher Pupillendurchmesser

Die Detaildarstellungen der Pupillendurchmesser der einzelnen Probanden befinden sich in Anhang 5.

Diskussion und Zusammenfassung

Einen auffälligen Fixationsbereich stellte in den Vorversuchen 2 und 3 der Greifer dar. Dies kann einerseits daran liegen, dass er den nächstgelegenen Punkt des Roboters zum Probanden darstellt. Andererseits wird, wenn der Greifer sich nicht im Blickfeld befindet, größtenteils der höchstgelegene Teil des Roboters fixiert, der den geringsten Abstand zum Fixpunkt aufweist. Die auffallend blaue Farbe könnte für die Fokussierung verantwortlich sein. Gegen diese Vermutung spricht jedoch, dass den leuchtenden orangefarbenen Kappen des Roboters keine gesonderte Aufmerksamkeit zukommt. Diese Auffälligkeit soll in einem weiteren Vorversuch betrachtet werden.

Weiterhin wird festgestellt, dass sich die Nähe einer Roboterbewegungen auf der X-Ebene stärker auswirkt als die Nähe auf der Z-Ebene. An dieser Stelle kann vermutet werden, dass dieser Effekt nicht nur mit der direkten Nähe zum Körper der Probanden in Verbindung steht, sondern auch mit der Blickachse.

Vorversuch 1 zeigte, dass sich die Verschiebung der Roboterbewegung hinsichtlich des Winkels zur Blickachse in den peripheren Bereich deutlich stärker auswirkt, als die Reduzierung des Abstands. Die Übertragung dieser Erkenntnis auf die vertikale Betrachtung (Z-Ebene) kann die stärkere Reaktion hinsichtlich der X-Ebene durch eine größere Entfernung von der Blickachse erklären. Dies bedeutet, dass neben der horizontalen Peripherie, wie in Vorversuch 1 gezeigt, auch die vertikale Peripherie bei der Auslegung einer Mensch-Roboter-Kooperation betrachtet werden muss.

In Vorversuch 3 findet die Roboterbewegung in dem intimen Distanzbereich der Probanden statt. Dies ist die erste Bewegung des Roboters, die sich in Greifweite der Probanden abspielt, d. h. ein Kontakt ist durch die entsprechende Armbewegung der Testpersonen möglich.

Obwohl ein solcher Kontakt nicht Teil des Versuchs ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Probanden, zumindest unterbewusst, auf eine Kollision vorbereiten und dadurch angespannter sind. Mit dieser Beunruhigung steigen auch die Fixationen auf den Roboter und die Ablenkung vom Fixpunkt. Dieser mögliche Effekt, der aus der Reduzierung der Roboterbewegung auf 10 cm resultiert, wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

4.1.4 Voruntersuchung 4 – Farbwirkung des Robotergreifers

In der Voruntersuchung 4 soll der Diskussionspunkt der Farbwirkung des blauen Robotergreifers (siehe Diskussion in Abschnitt 4.1.3) knapp geprüft und der Versuchsablauf aus den Voruntersuchungen 2 und 3 zum direkten und indirekten Blickfeld mit einem sitzenden Probanden nachvollzogen werden. Insbesondere leistungsgewandelte Mitarbeiter, deren Unterstützung ein Hauptfeld der Mensch-Roboter-Kooperation darstellt, benötigen häufig einen Sitzarbeitsplatz. Aus diesem Grund sollen die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen 2 und 3 an einem Sitzarbeitsplatz verifiziert werden.

Hypothesen zur Voruntersuchung

Dementsprechend unterliegt die Voruntersuchung 4 den folgenden Hypothesen:

VH4.1: Der Roboter löst bei häufiger Bewegung innerhalb des Blickfeldes Blickablenkungen vom Fixpunkt aus. Der Grad der Ablenkung ist dabei bei einem Sitzarbeitsplatz mindestens genauso hoch wie bei einem Steharbeitsplatz.

VH4.2: Der blaue Greifer stellt einen geringeren Ablenkungscharakter dar, als ein Greifer in Signalfarbe.

Versuchsdesign und –durchführung

Vorversuch 4 wird mit einem Probanden durchgeführt. Der Proband erhält einen Sitzarbeitsplatz in einem Besprechungsraum und eine Unterlage zum Lesen und wird gebeten, sich auf den Text zu konzentrieren. Dieser Versuch wird mit drei Durchläufen in jeder Bewegungsbahn a und b des Roboters ausgeführt, siehe Abbildung 52.

Im ersten Teil des Versuchs wird die Roboterbahn a abgefahren (siehe Abbildung 52), die sich außerhalb des direkten Blickfeldes des Probanden befindet.

Erst im Versuchsteil b dringt der Greifer des Roboters in das direkte Blickfeld des Probanden ein. Der Roboterarm befindet sich nur zu sehr geringem Anteil im Blickfeld des Probanden.

In den einzelnen Versuchsteilen wird der Greifer mit farbigem Papier beklebt. Zunächst wird Papier in leuchtendem Blau verwendet, das die reguläre Farbe des MRK Greifers darstellen soll. Danach wird die klassische Signalfarbe Rot ausgewählt, durch die Hypothese VH4.2 bestätigt werden soll. Daraufhin wird die Reihenfolge der Farben nochmals gewechselt, um potentielle Gewöhnungseffekte auszuschließen. Jeder Durchlauf des Versuchs dauert ca. 2 Minuten.

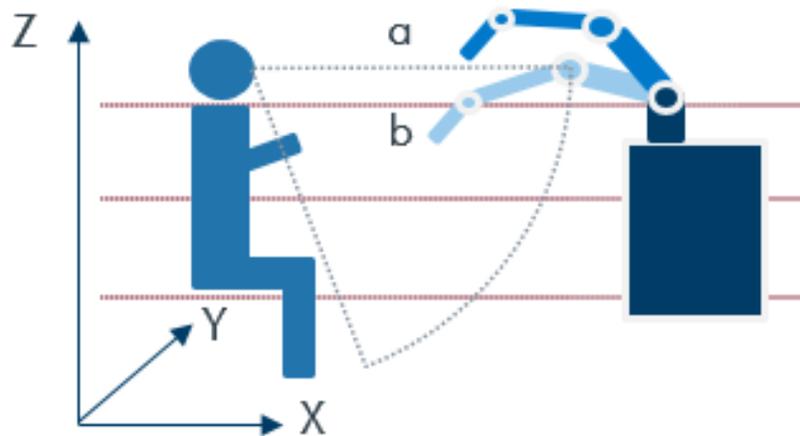


Abbildung 52: Vorversuch 4 – Versuchsskizze und Darstellung der Roboterbahnen

Beobachtung

Im ersten Versuchsteil gelingt es dem Probanden gut, sich auf das Lesen zu konzentrieren. Das Mitschneiden der Blickbewegung funktioniert einwandfrei und die aktuelle Lesestelle lässt sich gut mitverfolgen (Abbildung 53). Der Roboter dringt im normalen Lesefluss nicht in den direkten Blickbereich ein. Er ist lediglich zu sehen, wenn sich der Blick des Probanden nach oben richtet, beispielsweise beim Umblättern einer Seite.

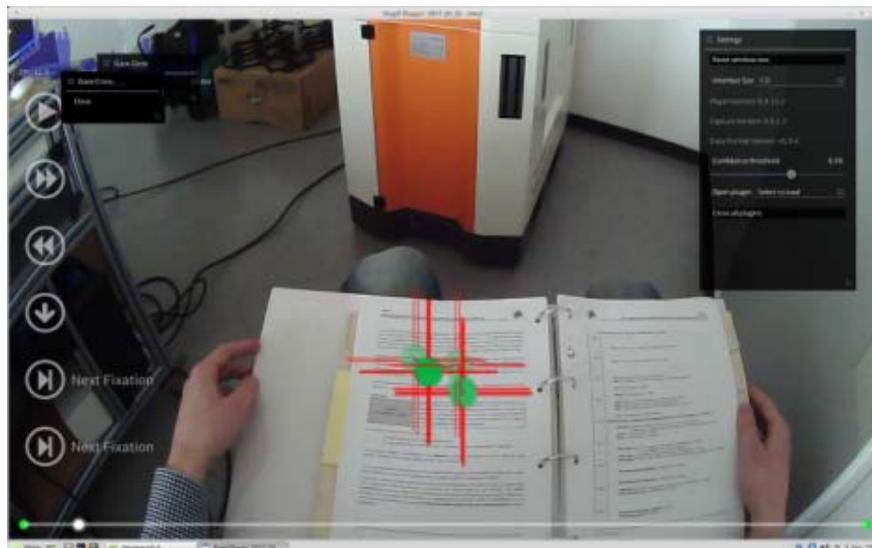


Abbildung 53: Blickfeld d. Probanden – Roboter außerhalb des Blickfeldes

Die Höhe, auf der der Roboter im zweiten Versuchsteil verfährt, ist so eingestellt, dass der Greifer komplett in das Blickfeld des Probanden eindringt. Jedoch ist die siebte Achse, die erste Achse am Roboterflansch / -greifer, des Roboterarms hinter und oberhalb des Greifers nur selten sichtbar, siehe Abbildung 54.

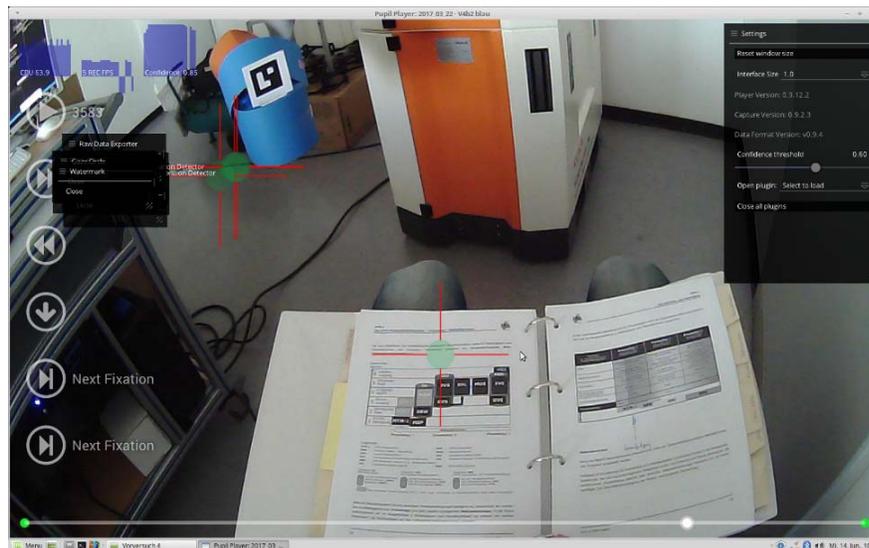


Abbildung 54: Blickfeld d. Probanden – Blauer Greifer im Blickfeld

Auswertung

Zunächst werden die Bilddaten daraufhin untersucht, zu welchem Anteil sich der Robotergreifer im Blickfeld des Probanden befindet. Die Bilddaten werden bereits bei leichtem Eintritt des Greifers in das Blickfeld dem Roboter zugeordnet.

In Versuchsteil a liegt dieser Anteil bei ca. 8% und steigt zum Versuchsteil b um das 12-fache auf ca. 89% an (Abbildung 55).

Die Analyse der Fixationsdaten zeigt, dass der Anteil der Fixationen, die nicht auf die Leseunterlage gerichtet sind, zwischen Versuchsteil a und b von ca. 1,3% um das 11-fache auf ca. 16% ansteigen.

Die nicht zielgerichteten Blicke des Probanden steigen somit annähernd im gleichen Faktor an, wie die Sichtbarkeit des Roboters.

Neben den Fixationen auf den Robotergreifer selbst, steigt auch die Häufigkeit der Fixationen auf den nicht beweglichen Teil des Roboters (FlexFellow Plattform) und die Umgebung im Besprechungsraum. Dies kann auf eine allgemeine Unruhe in der

Blickführung zurückzuführen sein, die durch die Bewegungen des Roboters ausgelöst wird. Die Hypothese 4.1 kann somit belegt werden.

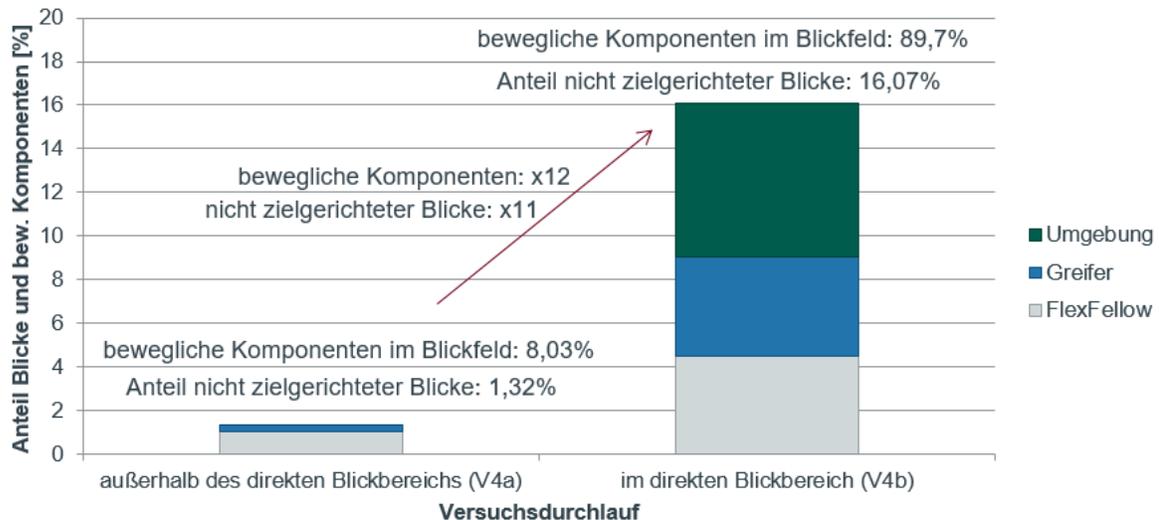


Abbildung 55: Vorversuch 4 – Auswertung der AOIs außerhalb des Lesebereichs

Der Anteil dieser Fixationen von 16,07% liegt zwischen den Werten von Schulter- und Hüftbereich der Vorversuche 2 und 3. Dies entspricht der relativen Höhe der Roboterbahn mittig des Oberkörpers des Probanden und stimmt mit der Bewegungshöhe in diesem Vorversuch überein. Die Fixationsmuster von sitzenden und stehenden Probanden liegen somit auf einem ähnlichen Niveau, weshalb Hypothese 4.1 zugestimmt werden kann.

Der Vergleich zeigt bei dem blauen Greifer einen Anteil der Konzentration auf die Kernaufgabe von ca. 79% und bei dem roten Greifer von ca. 91%, siehe Abbildung 56.

Die von der Kernaufgabe abweichenden Fixationen verteilen sich dabei auf den Greifer, die feststehenden Roboterkomponenten und die Umgebung. Hypothese 4.2 kann daher nicht angenommen werden, da in diesem Vorversuch eine stärkere Ablenkungswirkung bei dem blauen, anstatt dem roten Greifer vorliegt.

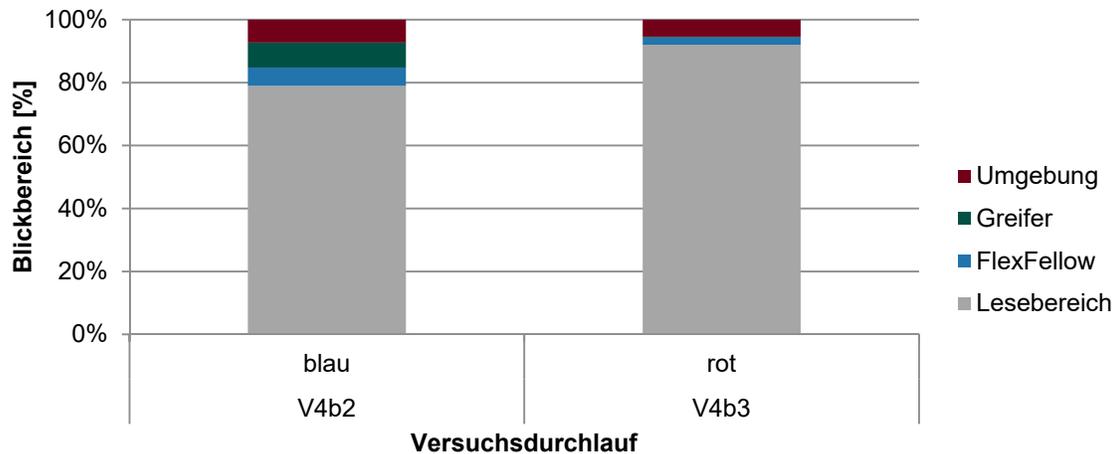


Abbildung 56: Vorversuch 4b – Auswertung nach Farbe des Greifers

Diskussion und Zusammenfassung

Dieser Vorversuch soll eine Einordnung für die Farbwirkung des blauen Robotergreifers darstellen, der in den vorherigen Vorversuchen einen deutlichen Aufmerksamkeitsfaktor darstellte. In Vorversuch 4 hatte die rote Farbgebung (Signalfarbe) eine geringere Farbwirkung als das Blau.

Während der Versuchsteile von VV4 sind mit der Steigerung der Fixationen auf den Robotergreifer auch die Fixationen auf die feststehenden Roboterkomponenten und die sonstige Umgebung angestiegen. Dies kann auf die allgemeine Unruhe des Probanden zurückführbar sein oder auf einen geringen Kontrast bei naheliegenden AOIs hindeuten, wie der orangefarbenen Roboterplattform.

4.1.5 Voruntersuchung 5 – Autonome Robotik

In den bisherigen Voruntersuchungen wurde die Zusammenarbeit von Probanden mit einem Knickarmroboter untersucht. Die Literaturrecherche und Marktanalyse zeigt jedoch neben dieser Roboterform auch eine deutliche Zunahme von autonomen Systemen (Abbildung 57). In der Voruntersuchung 5 soll daher die Gewöhnung an ein autonom und frei verfahrenes Robotersystem geprüft werden, während dieses in eine Fertigungslinie implementiert wird.



Abbildung 57: Autonom navigierender Reinigungsroboter der Fa. Cleanfix

Hypothesen

Dieser Vorversuch soll die Aufmerksamkeitswirkung des Knickarmroboters aus den bisherigen Vorversuchen mit einem autonomen Robotersystem vergleichen.

Hierzu sollen die Häufigkeit der Fixationen und Anzahl der Sakkaden aufgenommen und mit den vorab durchgeführten Untersuchungen verglichen werden.

VH5.1: Ein autonomer Roboter stellt ein deutliches Aufmerksamkeitsziel dar, das mit dem eines Knickarmroboters vergleichbar ist.

Die Untersuchung findet zum Start der Implementierung des Systems statt und soll die ersten Reaktionen des Probanden ausweisen.

VH5.2: Innerhalb des ersten Tages des Robotereinsatzes ist keine Abnahme der Ablenkungswirkung erkennbar.

Versuchsdesign

Diese fünfte Voruntersuchung findet in der direkten Produktionsumgebung statt, einer mechanischen Fertigung für Getriebewellen. In dem betrachteten Fertigungsbereich werden Drehteile von den Mitarbeitern auf ein Verkettungsband gelegt, das die Bauteile durch verschiedene, mechanische Bearbeitungsmaschinen schleust. Während dieser Bearbeitungsvorgänge sind die Prozessparameter durch die Mitarbeiter zu prüfen. Am

Ende des Fertigungsstranges führen die Mitarbeiter Qualitätskontrollen durch und legen die Bauteile in Gebinde für den Härteprozess. In diesem Fertigungsbereich wird ein Reinigungsroboter implementiert.

Der Versuch wird mit einem Probanden in drei Schritten durchgeführt, welche die ersten Stadien der Gewöhnung des Probanden an den Roboter aufzeigen sollen.

Zunächst werden die Blickdaten eines Probanden ermittelt, bevor der Roboter integriert wird. Diese Daten der Ausgangssituation (1) sollen als Referenz dienen. Nach der Inbetriebnahme des Roboters werden zwei Versuchsdurchläufe nach der ersten Stunde im Einsatz (2a) und nach drei Stunden im Einsatz (2b) durchgeführt. Die Aufnahmedauer beträgt jeweils ca. eine Stunde.

Aufgrund des großen Bewegungsraumes in der mechanischen Fertigung wird der Proband mit einem mobilen Trackingsystem ausgestattet. Durch die Nutzung eines kompakten PCs und einem Akkusystem lässt sich das Equipment in einem Rucksack unterbringen. Aus einem Büroraum, der in der Fertigung angesiedelt ist, kann die korrekte Aufnahme mittels per Funk verknüpftem Bildschirm überwacht werden.

Beobachtung

Bereits in der Ausgangssituation finden Fixationen statt, wie beispielsweise auf einen markanten, orangefarbenen Handschubwagen (Abbildung 58), auf zu bedienende Maschinen oder einen Kollegen.



Abbildung 58: Blickfeld d. Probanden – Ausgangssituation (1)

Der erste Versuchsteil (2a) - der Roboter ist 1 Stunde im Einsatz - zeigt erwartungsgemäß diverse Fixationen auf das Robotersystem. Ein Kollege wird priorisiert fokussiert (Abbildung 59, links), wenn er sich mit dem Roboter in einem Blickfeld befindet. Erst danach erfolgt die Fixation auf den Roboter, siehe Abbildung 59, rechts.



Abbildung 59: Blickfeld d. Probanden – Nach der ersten Stunde des Einsatzes (2a)

Im zweiten Versuchsteil mit Roboter (2b) findet produktionsbedingt ein technisches Gespräch mit dem besagten Kollegen statt. Dem Probanden ist es möglich, sich auf den Kollegen zu konzentrieren (Abbildung 60, links) und sich nicht von dem Roboter ablenken zu lassen, obwohl dieser sich im direkten Blickfeld bewegt. Nach dem Gespräch fixiert der Proband sofort den Roboter, siehe Abbildung 60, rechts.



Abbildung 60: Blickfeld d. Probanden – Nach 3 Stunden im Einsatz (2b)

Auswertung

Mitarbeiter der mechanischen Fertigung bedienen und kontrollieren mehrere Maschinen und Anlagen und sind weiterhin für das Handling von Bauteilen zuständig. Sie wechseln daher häufig ihre Position. Für die Auswertung der Fixationsdauer auf den Roboter ist es daher nötig, zunächst die tatsächliche Zeit zu bestimmen, in der der ebenfalls mobile Roboter sich im Blickfeld des Probanden befindet. Dieser Anteil liegt bei 26% in Versuchsteil a und 8% in Versuchsteil b. Dieser Unterschied ist auf die Arbeitsabläufe des Probanden zurückzuführen. Die geringere Zeit des Roboters im Blickfeld des Probanden fiel bereits während der Versuchsbeobachtung auf, weshalb sich der Versuchsteil b durch eine längere Aufnahmezeit auszeichnet. Die Angaben zu den Parametern der Versuchsteile werden daher nachfolgend in relativen Werten verglichen. Im weiteren Verlauf dieser Auswertung werden nur die Bereiche der Aufnahme verwendet, in denen der Roboter von der Kamera detektiert wurde.

Während sich der Roboter im Blickfeld des Probanden befindet, liegt der Anteil der Fixationen auf den Roboter bei 26% (bei 7% unbekanntem Blickdaten) in Versuchsteil a und bis 30% in Versuchsteil b, siehe Abbildung 61. Innerhalb der ersten Stunden des Robotereinsatzes kann daher nicht von einer Gewöhnung an das System ausgegangen werden. Der Anteil der Fixationen auf den mobilen Roboter steigt um 4% (unberücksichtigt der 7% Messabweichung).

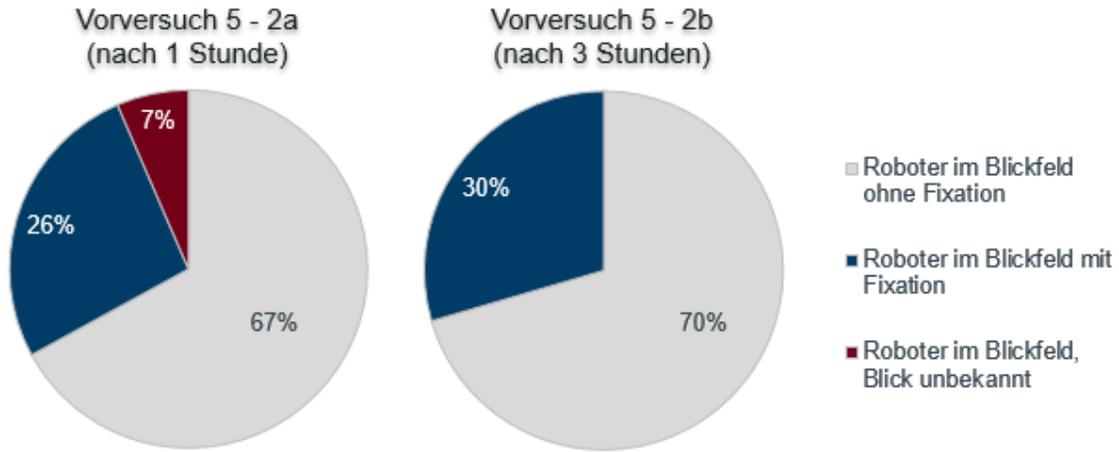


Abbildung 61: Vorversuch 5 – Verteilung der Fixationen (Roboter im Blickfeld)

Eine detailliertere Betrachtung der Fixation auf den Roboter ist durch die Dauer der jeweiligen Fixationen in Sakkaden / Minute sowie die Anzahl der Sakkaden in Frames / Fixation möglich.

In Versuchsteil a, direkt nach der ersten Fahrt des Roboters, finden in den AOI des Roboters 1,36 Sakkaden / Minute statt. Die durchschnittliche Dauer einer Fixation liegt bei 22,5 Frames / Fixation, d.h. ca. 350 ms, siehe Abbildung 62.

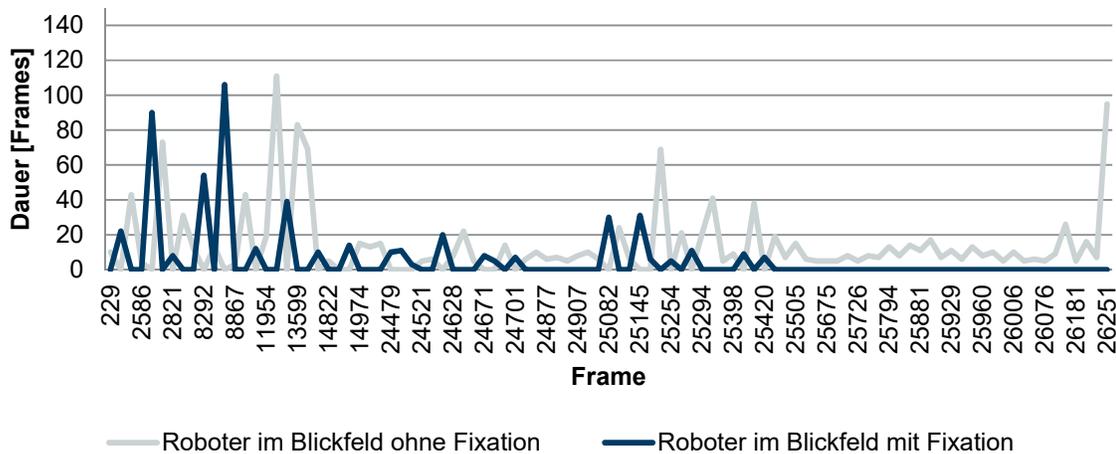


Abbildung 62: Vorversuch 5-2a – Fixationsdauer

In Versuchsteil b, drei Stunden nach dem ersten Kontakt des Probanden mit dem System, finden in den Bereich des Roboters 2,88 Sakkaden / Minute statt. Die Dauer

einer Fixation liegt im Durchschnitt bei 13,2 Frames / Fixation, d.h. ca. 200 ms, siehe Abbildung 63.

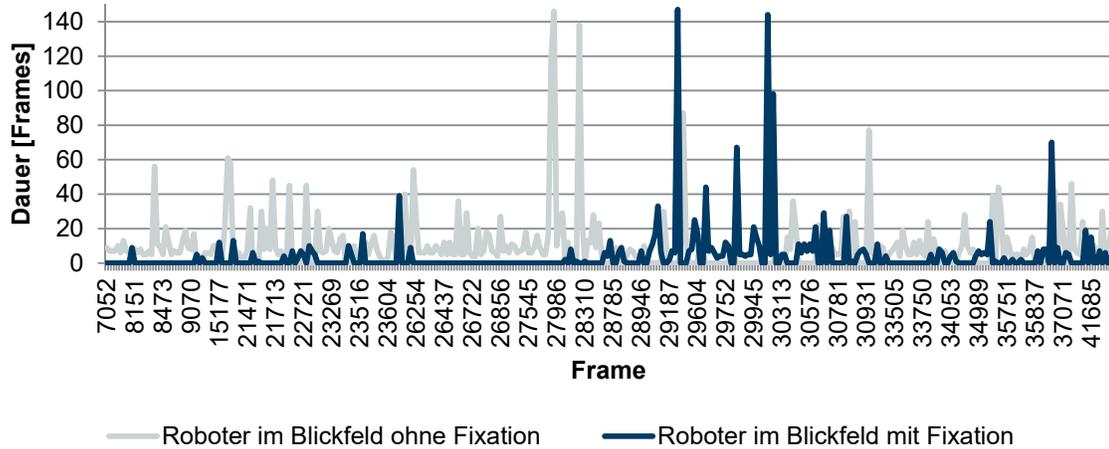


Abbildung 63: Vorversuch 5-2b – Fixationsdauer

Nach 3 Stunden im Einsatz sinkt die durchschnittliche Fixationsdauer auf den Roboter von 22,5 auf 13,2 Frames / Fixation, also um ca. 41%. Im Gegenzug steigt die Anzahl der Sakkaden jedoch von 1,4 auf 2,9 Sakkaden / Minute, d.h. um ca. 53% an.

Durch den starken Anstieg der Sakkaden kann aus diesem Vorversuch nicht auf eine Reduzierung der Ablenkungswirkung durch den Roboter in den ersten 3 Stunden des Einsatzes geschlossen werden. Eine Gewöhnung an den Roboter ist nur in geringer Form erkennbar, da der Blick kürzer auf dem fahrenden Reinigungsroboter verweilt (Frames/ Fixation). Dies lässt Rückschlüsse auf eine sinkende Konzentration auf den Roboter zu. Allerdings wird häufiger kontrolliert, wo sich der Roboter befindet (Sakkaden/Minute), die Anzahl der Sakkaden auf den Roboter nimmt zu. Da während einer Sakkade im Allgemeinen keine Konzentration möglich ist, können die vermehrten Sakkaden die alltägliche Konzentration des Probanden herabsenken. Die Hypothese VH5.2 kann auf dieser Basis nicht abgelehnt werden.

Für die Betrachtung von Hypothese VH5.1 ist der Vergleich dieser Werte mit denen eines Knickarmroboters erforderlich. Als Referenz werden die Werte aus Vorversuch 2 und 3 herangezogen und die Roboterebenen des Knie- und Hüftbereichs verwendet, da diese der Bewegungshöhe des autonomen Roboters entsprechen.

In den Vorversuchen 2 und 3 liegt die Dauer einer Fixation bei maximal ca. 29 Frames, d.h. ca. 500 ms, abhängig von der Nähe und Bewegungshöhe des Roboters. Die beiden Fixationsdauern des autonomen Roboters liegen mit ca. 13 bis 22,5 Frames innerhalb der Grenzwerte aus den Vorversuchen 2 und 3.

Die Anzahl der Sakkaden liegt in den betrachteten Knie- und Hüftbereichen der Vorversuche 2 und 3 zwischen ca. 1,3 und 16 Sakkaden / Minute. Die Anzahl der Sakkaden auf den autonomen Roboter von 1,4 und 2,9 Sakkaden / Minute liegt somit im Rahmen der Werte aus den Vorversuchen 2 und 3, befindet sich jedoch im unteren Bereich.

Somit kann für die beiden Parameter der Fixationsdauer und Sakkadenanzahl festgehalten werden, dass sich die Werte des autonomen Systems innerhalb der Bandbreite der Werte aus den Vorversuchen mit Knickarmroboter befinden. Auf Basis der Vergleichbarkeit dieser Werte ist Hypothese VH5.1 verifiziert.

Während der Versuchsauswertung konnte weiterhin ermittelt werden, dass die Fixationen auf den Roboter einem klaren Muster folgen. Durchschnittlich 35 Frames, und damit ca. einer halben Sekunde nach dem Auftauchen des Roboters im Blickfeld wird dieser fixiert (Abbildung 64). Die Fixationsdauer variiert in Abhängigkeit der räumlichen Gegebenheiten und Bewegungsrichtung von Proband und Roboter. Schon bevor der Roboter aus dem Blickfeld herausfährt, wird die Fixation beendet.

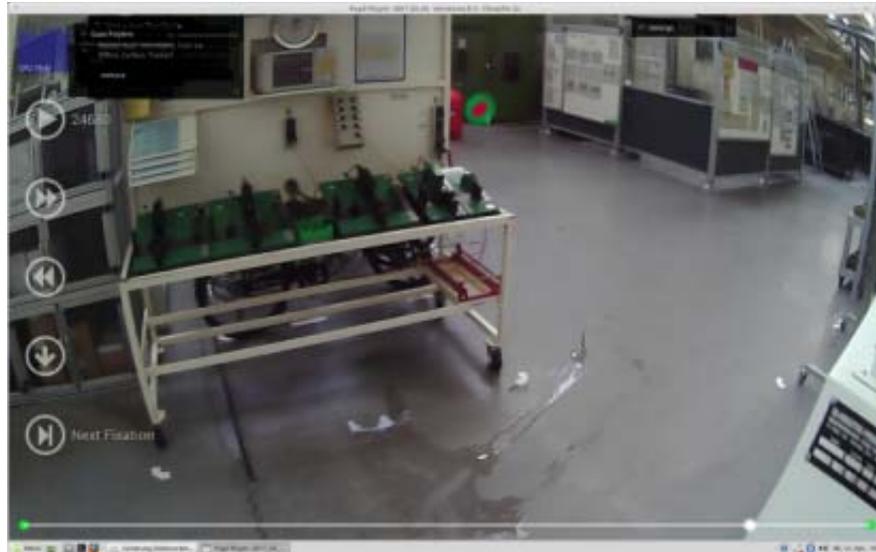


Abbildung 64: Blickfeld d. Probanden – Nach dem Auftauchen des Roboters

In Vorversuch 2b zeigt eine Videosequenz deutlich die unterbewusste Anpassung des Probanden an den Roboter. Ist der mobile Roboter kurzzeitig aus dem Blickfeld des Probanden verschwunden, sucht dieser den Roboter an der letzten bekannten Position, wengleich der Roboter sich dort nicht mehr befindet, siehe Abbildung 65.



Abbildung 65: Blickfeld d. Probanden – Letzte bekannte Roboterposition

Diskussion und Zusammenfassung

Vorversuch 5 betrachtet erstmals einen im Raum, im speziellen einer Fertigungslinie, bewegten Roboter. Ebenso befindet sich der Proband in Bewegung, wodurch das Aufeinandertreffen von Mensch und Roboter nur sporadisch und ungeplant stattfinden kann.

Dieser Zustand zeigt sich im Blickverhalten des Probanden. Beim Eintreten des Roboters in das Blickfeld des Probanden, wird dieser sofort fixiert. Befindet sich der Roboter nicht im Blickfeld des Probanden, sind Explorationsblicke im Raum erkennbar, insbesondere auf der zuletzt bekannten Position des Roboters.

Trotz dieser deutlichen Beeinflussung des Probanden befinden sich die Kollegen des Probanden immer zuerst im Fokus, erst nach der Beendigung einer Interaktion verschiebt sich die Aufmerksamkeit auf den Roboter.

4.1.6 Zusammenfassung der Vorversuche

Die fünf Voruntersuchungen betrachten verschiedene Aspekte, die eine Roboterbewegung beschreiben und die bei der Auslegung einer Mensch-Roboter-Kooperation einfach variiert werden können.

Sowohl die Veränderung des Abstandes zwischen Mensch und Roboter, als auch die Verlegung des Roboters in den peripher wahrnehmbaren Blickbereich zeigen vermehrte Reaktionen im Blickverhalten. Dieses Phänomen konnte für die horizontale und die vertikale Blickachse nachgewiesen werden.

Detaillierter zeigen die Vorversuche, dass die Annäherung des Roboters in X-Richtung, d.h. eine Annäherung an den Körper, eine stärkere Reaktion hervorruft, als die Annäherung in Z-Richtung. Dieser Effekt kann durch die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Kontaktes zwischen Mensch und Roboter erklärt werden. Dieser Aspekt wird aufgrund seiner Prägnanz in der Hauptuntersuchung genauer betrachtet. Die Fokussierung auf den Greifer des Roboters kann ebenfalls mit dessen häufiger Nähe zum Probanden erklärt werden. Ein Gegenversuch mit einem Greifer in Blau und zusätzlich in Signalrot konnte die Hypothese der Farbwirkung jedoch nicht entkräften. Dieser Gesichtspunkt wird daher in der Hauptuntersuchung weiterhin berücksichtigt.

Eine nochmals deutlichere Verschiebung der Aufmerksamkeit wird durch die Versetzung des Roboters in den peripheren Blickbereich des Probanden hervorgerufen.

Die Probanden zeigten, dass sie sich trotz ungewohnter und unbekannter Roboterbewegung auf einen Kollegen konzentrieren können und sogar ein technisches Gespräch während der Anwesenheit des Roboters möglich ist. Daraus ergibt sich jedoch, dass ein Mensch ebenfalls als Ablenkung betrachtet werden sollte. Dieser Aspekt wird in der Hauptuntersuchung wieder aufgenommen.

Die gewonnenen ersten Erkenntnisse über die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter sollen in die nachfolgende Hauptuntersuchung eingehen und mit diesen ersten Tendenzen bei der Gestaltung des Hauptversuchs helfen. Der folgende Hauptversuch soll in statistisch relevanter Größe eine Empfehlung für die Gestaltung einer Mensch-Roboter-Kooperation im industriellen Umfeld ermöglichen.

4.2 Versuchsplanung und -grundlagen

Die Eingrenzung auf die Charakteristiken einer Mensch-Roboter-Kooperation, sowie die Ergebnisse aus den fünf Voruntersuchungen ergeben Untersuchungsmerkmale, die in der Hauptuntersuchung genauer betrachtet werden.

Der Versuchsaufbau soll eine Roboterapplikation enthalten, die eine Einteilung der Roboterbahn entsprechend verschiedener Bewegungsmuster ermöglicht. In Abhängigkeit der jeweiligen Roboterbewegung soll mittels Eye-Tracking die Aufmerksamkeitsverteilung auf definierten AOIs untersucht werden. Der Zusammenhang von Aufmerksamkeits- und Fixationsmustern mit der Roboterbahn soll eine Empfehlung für die optimale Roboterbewegung ermöglichen. Weiterhin soll die Fixation auf den Roboter in Abhängigkeit des direkten oder peripheren Blickfeldes betrachtet werden.

Das Herzstück des Versuchsaufbaus soll eine gewollte Interaktion in Form eines Kontaktes zwischen Mensch und Roboter darstellen, da diese Form der Zusammenarbeit bisher in keiner wissenschaftlichen Arbeit betrachtet wurde. Die erforderliche Aufmerksamkeit und resultierende Beanspruchung soll sowohl subjektiv als auch objektiv betrachtet werden.

4.2.1 Auswahl des Arbeitsplatzes und der Probanden

Sowohl die Literaturrecherche als auch vielfältige Besichtigungen in Produktionsstandorten zeigen MRK größtenteils als kooperative Stationen, an denen Mensch und Roboter nebeneinander, jedoch nicht direkt miteinander arbeiten.

Auf die in der Industrie bisher selten realisierte Form der engen Zusammenarbeit soll sich die Hauptuntersuchung konzentrieren. Zu diesem Zweck wurde ein Schulungsarbeitsplatz ausgewählt, an dessen Realisierung die Schreiberin dieser Arbeit maßgeblich beteiligt war. Der Arbeitsplatz weist, als Baustein eines „Sensibilisierungskonzeptes für die Industrie 4.0“, verschiedene Formen der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter auf.

Das Robotermodell für die Hauptuntersuchung wird für eine bessere Vergleichbarkeit analog zu den Vorversuchen ausgewählt, siehe Abschnitt 4.

Bei diesem Robotermodell und der entsprechenden Programmstruktur handelt es sich um einen Roboter nach der Kategorie der Leistungs- und Kraftbegrenzung (ISO/TS 15066, 2016, S. 22). In einer Sicherheitsbetrachtung nach ISO/TS 15066 (2016) müssen die potentiellen Gefahrstellen der Applikation ermittelt werden. Dies sind die Bewegungen im freien Raum zum Mitarbeiter hin sowie die Quetschgefahr beim Aufnehmen des Werkstücks durch Roboter und Greifer. Die ermittelten Werte liegen innerhalb der zulässigen Kraft- und Druckgrenzwerten (ISO/TS 15066, 2016, S. 33), siehe Anhang 6.

Die vierzig Probanden für den Versuch werden u. a. nach ihrem Arbeitsumfeld, ihrem Geschlecht, ihrem Alter und ihrer Körpergröße ausgewählt. Sie bieten somit ein breites Spektrum an Charakteristiken (vgl. Stach, 2015, S. 24).

Im Hinblick auf das Alter zeigte bereits die Literaturrecherche, dass beispielsweise Probanden mit zunehmendem Alter eine geringere Akzeptanz von Servicerobotern aufweisen. Übertragen auf den industriellen Kontext kann somit davon ausgegangen werden, dass sich jüngere Mitarbeiter besser für die ersten Einsätze mit einem kooperierenden Roboter eignen. Die Akzeptanz der älteren Mitarbeiter lässt sich dementsprechend verbessern, wenn durch den Robotereinsatz eine längere

Berufstätigkeit, größere Autonomie und / oder eine Arbeitserleichterung, z. B. durch Übernahme schwerer Lasten, ermöglicht wird.

Für diesen Hauptversuch wird daher auf eine ausgeglichene Altersverteilung geachtet, die im Durchschnitt 38 Jahren aufweist. Das Alter der Versuchsteilnehmer liegt somit durchschnittlich fünf Jahre unterhalb des deutschlandweiten Durchschnitts der Arbeitnehmer von 43,3 Jahren (Statistisches Bundesamt, 2017).

4.2.2 Versuchsdesign

Der Versuchsablauf wird zunächst durch den Probanden per App auf einem Touchpanel gestartet. Daraufhin wird in der Produktionsanlage für M&Ms (nachfolgend MM-Anlage genannt) eine Kunststoffdose vereinzelt und durch einen pneumatischen Zylinder auf ein Verkettungsband geschoben. Befindet sich die Dose unterhalb einer Schwerkraftrutsche stoppt das Verkettungsband. Mittels Initiatoren erhält der Behälter für die M&Ms ein Signal, für eine bestimmte Zeit eine Klappe zu öffnen. Dadurch wird eine kleine Menge M&Ms freigegeben und über die Schwerkraftrutsche in die Dose befördert. Nach der Befüllung und einer optischen Prüfung wird die Dose mittels Verkettungsband weiterbefördert und unter einem Portal erneut gestoppt. Dieses Portal mit Saugnapf entnimmt einen Dosendeckel aus einer Zuführung und montiert diesen auf der Dose. Ebenfalls mittels Portals wird ein Label mit DMC-Code auf dem Deckel platziert. Nach einer abschließenden Prüfung dieses Codes erreicht die befüllte Dose das Ende des Verkettungsbandes. Dieser Prozess soll von den Probanden überwacht werden.

Nachdem das fertige Bauteil am Ende des Verkettungsbands angekommen ist, wird per SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) ein Signal an den Roboter gesandt, dieses abzuholen. Der Roboter startet seine Bewegung erst nach Signaleingang von seiner Basisposition zum Abholplatz. Dort greift er das Werkstück und fährt daraufhin direkt auf den Probanden zu. Zentral im Raum bleibt der Roboter stehen und hält das Bauteil in einer ergonomischen Höhe für den Mitarbeiter bereit.

Der Roboter wartet in ausgestreckter Lage auf die Abnahme der Dose durch den Probanden, die dieser durch minimalen Druck von unten gegen den Robotergreifer einleitet. Auf diese Berührung hin öffnet der Roboter den Greifer und das Bauteil wird von dem Probanden übernommen. Nach einer kurzen Wartezeit begibt sich der Roboter

zurückweichend in seine Ausgangsposition und wartet auf das Signal für die nächste Bauteilabholung. Die entsprechenden Komponenten des Versuchs sind in Abbildung 66 dargestellt:



Abbildung 66: Aufbau des Trainingskonzeptes mit MRK Roboter

Der Proband befindet sich in verschiedenen Formen der Kooperation mit dem Roboter. Zunächst überwacht der Proband den Produktionsprozess der Maschine.

Der Roboter wartet bis zum Signalaustausch in seiner Basisposition und startet daraufhin im MRK Modus der Kraft- und Leistungsbegrenzung. Nach der Querbewegung zum Aufnahmepunkt der Dose fährt der Roboter frontal auf den Probanden zu.

Für die Übergabe des Produktes ist eine Handführung am Greifer des Roboters erforderlich. Erst daraufhin entfernt dieser sich im erneuten MRK Modus rückwärts zurück in seine Basisposition.

Dieser Ablauf ist in Abbildung 67 in schematischer Form dargestellt.

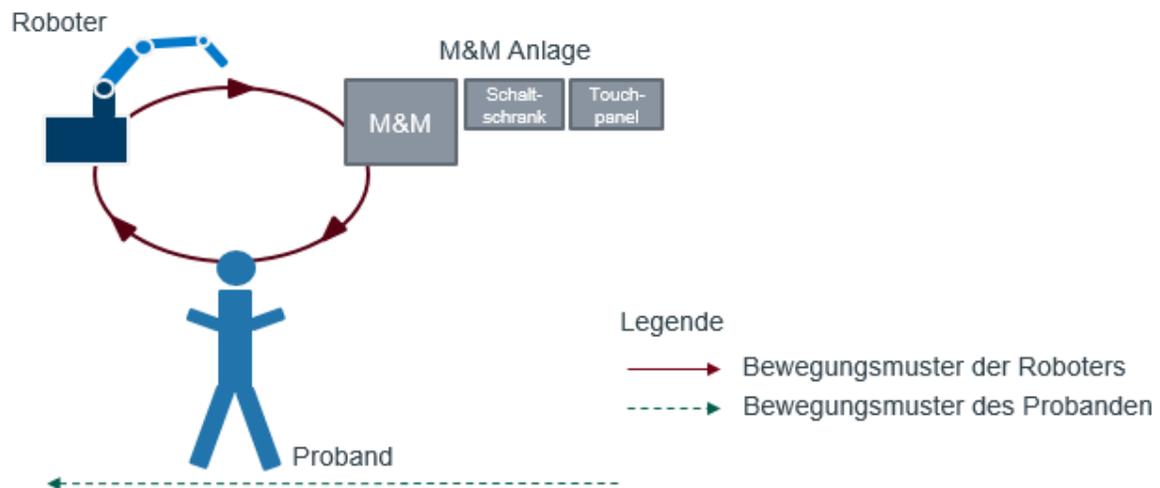


Abbildung 67: Schematischer Aufbau der Hauptuntersuchung

Der Versuchsaufbau deckt in dieser Form viele und anwendungsnahe Formen der Mensch-Roboter-Zusammenarbeit, wie sie in Produktionsumgebungen zum Einsatz kommen, ab.

Gleichzeitig stellt dieser Aufbau die erste Untersuchung einer Mensch-Roboter-Kooperation dar, in der der Roboter sich nicht ausschließlich frontal im Blickfeld des Menschen befindet, dar (vgl. Koppenborg et al, 2013; Thiemermann, 2005).

4.2.3 Allgemeine Vorbereitung

Die Vorbereitung des Versuchs erfordert zunächst die Vorstellung der verwendeten Systeme und des Fragebogens bei den Fachreferenten des Datenschutzes und des Betriebsrats.

Weiterhin wird die Zielsetzung dieser Arbeit, die Ermittlung der Belastung von MRK auf einen Menschen und das entsprechende Vorgehen mittels praktischer Versuche, im Management und direkt den Mitarbeitern in Teamrunden vorgestellt. Für die Akzeptanz dieser Untersuchung stellte es sich als äußerst positiv heraus, dass die Verfasserin dieser Arbeit in ihrer Tätigkeit als Fertigungsplanerin den meisten Mitarbeitern bereits persönlich bekannt ist.

Zur Vorbereitung wurde die Funktionalität der Technik direkt am Arbeitsplatz mehrfach getestet und der Fragebogen in seiner Gesamtheit auf Verständlichkeit innerhalb der Voruntersuchungen geprüft.

4.2.4 Gestaltung des Fragebogens

Der Fragebogen beginnt mit einer kurzen Einleitung zum Versuchsgrund und –umfang; diese ist in Form eines persönlichen Anschreibens aufgebaut. Der Inhalt dieser Einleitung soll jedoch bereits im Gespräch persönlich vermittelt werden. Da es sich bei dieser Evaluation nicht um eine Massenbefragung handelt, besteht die Möglichkeit, das Vorgehen individuell vorzustellen und auf eventuelle Unklarheiten und Fragen direkt zu reagieren.

Erstellung des Fragebogens

Für die Befragung innerhalb dieser Arbeit wird auf vorhandene und bereits validierte Fragen und Fragebögen zurückgegriffen.

Die Nutzung solcher, bereits angewandter Fragen, bietet viele Vorteile, insbesondere einen hohen Grad der Einhaltung der Testgütekriterien. Auch wird das Risiko eines Interpretationsspielraums durch den Probanden gemindert. Dies verhindert eine fehlerhafte Beantwortung der Fragen aufgrund von Missverständnissen. Zusätzlich bietet die Nutzung von validierten Fragen den Vorteil einfacher und bereits getesteter Formulierungen.

Da bis dato noch nicht verfügbar, wird für diese Studie eigens ein Fragebogen zur Roboterakzeptanz entwickelt, wobei die Items aus unterschiedlichen Studien und etablierten Fragebögen zusammengestellt werden.

Zu allen Versuchen wird ein Fragebogen an die Probanden ausgeteilt. Für den begleitenden Fragebogen zu einem Versuch bietet sich eine Zweiteilung an: Zunächst werden allgemeine Themen und nach dem Versuch spezifische Erfahrungen abgefragt.

In dem Fragebogenteil 1, der vor dem Versuch ausgefüllt wird, werden zunächst sechs allgemeine Fragen zur Person gestellt, welche die Grundvoraussetzungen des Probanden abfragen. Weiterhin werden die bisherigen Erfahrungen des Probanden mit Technik und Robotern im Speziellen (vier Items) erfragt. Dieser Teil des Fragebogens dient dazu, die individuellen Interessen, Erwartungen und Befürchtungen der Probanden zu erfahren (Ortmann & Guhlke, 2014, S. 20).

Nach dem Versuch folgen im Fragebogenteil 2 die Items zur empfundenen Beanspruchung und Einschätzung der Robotik. Dieser Part beginnt mit dem subjektiven Empfinden während des Versuchs, der durch den NASA TLX Fragebogen (sechs Items)

abgedeckt wird. Darauf folgen zehn Items, die sich auf die Einstellung zu einem Roboter nach der Versuchsdurchführung beziehen.

Teil 1a - Vor dem Versuch

Der Fragebogen wird durch sechs allgemeine Items zur Person eingeleitet. Diese beziehen sich auf die objektiven Eigenschaften des Probanden¹⁶.

Wie alt sind Sie? (Schmaltz, 2009, S. 271)

Sind Sie männlich oder weiblich? (Statistisches Bundesamt, 2016e, S. 2; survio, 2018, S. 1)

Welche Erwerbssituation passt für Sie? (Statistisches Bundesamt, 2016e, S. 5)

Wie viele Jahre Erfahrung haben Sie in der direkten Produktion? (Schmaltz, 2009, S. 271)

Sind Sie eher Rechts- oder Linkshänder? (vgl. Götze, 2015, S. 19)

Wie groß sind Sie? (vgl. KIT, 2018, S. 1)

Teil 1b - Ihre bisherigen Erfahrungen

Die bisherigen Erfahrungen des Probanden mit Robotern und Technik im Allgemeinen sollen ebenfalls im Vorfeld des Versuchs erhoben werden. Hierfür wird auf diverse Items des Arbeitspapiers zur *Einstellung der Öffentlichkeit zu Robotern* der Europäischen Kommission zurückgegriffen (2012, S. 3 - 6). Die Probanden sollen ihre Zustimmung zu den gestellten Aussagen auf einer sechsstufigen Skala einordnen.

¹⁶ Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Aspekt der kulturellen Herkunft sowie der schulische Abschluss der Probanden nicht erfragt.

Bitte sagen Sie mir, ob Sie an wissenschaftlichen Entdeckungen und technologischen Entwicklungen [...] interessiert sind (QA1, EK, 2012, S.3).

Die erste Aussage dieses Abschnitts prüft das allgemeine technische Interesse des Probanden sowie das Interesse am Neuheitsgrad technischer Entwicklungen. Ein hohes allgemeines Interesse an Technik kann ein Indiz für die Aufgeschlossenheit bezüglich des neuen Robotersystems sein.

Ich zeige Ihnen nun zwei Bilder. Bitte sagen Sie mir zu jedem Bild, inwieweit dieses Ihrer Vorstellung von Robotern entspricht (QA2, EK, 2012, S. 4).

Den Probanden werden zu diesem Item zwei Bilder vorgelegt; neben dem Miniaturabdruck im Fragebogen werden diese dem Probanden auch im Format DIN A4 ausgehändigt. Das eine Foto zeigt einen klassischen Industrieroboter hinter einem Schutzzaun, das andere einen Staubsaugroboter für den privaten Haushalt. Für beide Fotos soll die Konformität mit dem Begriff Robotik in der Antwortskala angegeben werden. Der Stand des Wandels der Robotik von einem industriellen Einsatz in den privaten Bereich soll in diesem Item mit dem mentalen Modell des Probanden abgeglichen werden. Eine hohe Konformität mit dem konventionellen Roboter und Ablehnung des Serviceroboters kann ein Indiz für ein starres Erwartungsbild und potentielle Ablehnung des neuartigen Versuchsroboters sein.

Nutzen Sie derzeit oder haben Sie jemals solche Roboter zu Hause oder am Arbeitsplatz genutzt (z.B. einen Staubsaug-Roboter im Haushalt oder einen Industrieroboter an der Arbeit)? (QA3, EK, 2012, S. 5)

Die Frage steht im Zusammenhang mit der ersten Frage dieses Versuchsteils, die das grundlegende technische Interesse betrachtet. Darauf aufbauend soll diese Frage die tatsächliche Bereitschaft der Probanden zur Nutzung und Zusammenarbeit mit Robotern aufzeigen.

Ist das Bild, das Sie von Robotern haben, alles in allem [...] positiv [...]? (QA4, EK, 2012, S. 6)

Diese Frage soll die Probanden zu einer konkreten Einordnung ihrer persönlichen Einstellung bezüglich Robotern aufrufen. Die Antworten sind im direkten Zusammenhang mit der vorherigen Definition eines Roboters zu betrachten.

Mit einem weiteren Item in diesem Abschnitt sollte ursprünglich abgefragt werden, ob der Proband mit dem Konzept eines schutzzaunlosen Roboters vertraut ist. Diese Frage sollte einstufen, welchen Neuheitscharakter der Versuchsroboter für den Probanden hat. Im Vorfeld des Aufbaus des Roboters in dem Fertigungsbereich wurden Roboter und Konzept jedoch ausführlich vorgestellt, weshalb die Frage aus dem Katalog entfernt wurde.

Teil 2 - Nach dem Versuch

Direkt nach dem Versuch soll die subjektive Beanspruchung, insbesondere die subjektive Wahrnehmung, der Stress sowie die Erwartungskonformität ermittelt werden. Hierfür wird der etablierte NASA Task Load Index (NASA TLX) Fragebogen in der deutschen Form nach Pfendler und Widdel (1988; Pfendler, 1993, S.28) verwendet.

Wie hoch waren die geistigen Anforderungen der Aufgabe?

Wie hoch waren die körperlichen Anforderungen der Aufgabe?

Wie hoch war das Tempo, mit dem die einzelnen Arbeitsschritte der Aufgabe aufeinander folgten?

Wie erfolgreich haben Sie die geforderte Aufgabe Ihrer Ansicht nach gelöst?

Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um Ihre Leistung zu erreichen?

Wie verunsichert, entmutigt, gereizt und verärgert waren Sie?

Die allgemeine Einstellung zu Robotern wird durch die Vorstellung von Aussagen, denen zugestimmt oder die abgelehnt werden sollen, ermittelt. Fünf der sieben Aussagen wurden aus dem bereits erwähnten Arbeitspapier der Europäischen Kommission entnommen (EK, 2012, S. 8). Zwei weitere Aussagen wurden zusätzlich eingefügt, um neben den allgemeinen Fragen auch direkt auf den Roboter einzugehen.

Roboter sind gut für die Gesellschaft, weil sie Menschen helfen (QA5, EK, 2012, S. 8).

Roboter vernichten Arbeitsplätze (QA5, EK, 2012, S. 8).

Roboter sind notwendig, da sie Arbeiten erledigen können, die für Menschen zu schwer oder zu gefährlich sind (QA5, EK, 2012, S. 8).

Die ersten drei Aussagen können im direkten Zusammenhang zueinander betrachtet werden. Sie sollen zeigen, ob der Proband den Roboter als Hilfsmittel oder Konkurrent um seinen Arbeitsplatz betrachtet. Weiterhin soll das Vertrauen des Probanden in die Technologie und die Ausführung der Tätigkeit durch den Roboter aufgezeigt werden.

Ich brauche eine lange Gewöhnungszeit, um mit dem [Versuch-]Roboter zurechtzukommen (vgl. Ollermann, 2007, S. 284).

Aufbauend auf die vorherigen drei soll diese Aussage die persönliche Gewöhnungszeit ermitteln und klären, wie offen der Proband der Veränderung seines Arbeitsplatzes und dem Versuchsroboter im Speziellen gegenübersteht. Dieses Item bezieht sich außerdem auf den ersten Einsatz eines kooperierenden Roboters und die Bewertung dieser Technologie.

Bei Robotern handelt es sich um eine Form der Technologie, die eine sorgsame Handhabung erfordert (QA5, EK, 2012, S. 8).

Aussage 5 zielt auf die Einschätzung des Probanden hinsichtlich des Sicherheitsempfindens und des Gefährdungspotentials durch einen Roboter ab. Eine deutliche Zustimmung zur sorgfältigen Handhabung eines Roboters kann als Indiz für negative Erfahrungen gesehen werden.

Ich finde den Versuchsroboter nützlich für meine Arbeit (Schmaltz, 2009, S. 277).

Die Einschätzungen zu diesem Punkt sollen zeigen, wie sinnvoll der Roboter von den Probanden erachtet wird und wie sie seinen Einsatz, konkret seinen Nutzen für ihre alltägliche Arbeit bewerten. Benutzerfreundlichkeit, Usability und Fehlfunktionen sollen mit diesem Item beurteilt werden.

Der weitverbreitete Einsatz von Robotern kann zur Förderung von Beschäftigungsmöglichkeiten führen (QA5, EK, 2012, S. 8).

Hierbei sollen die Aussagen zum Beschäftigungsrisiko durch die Robotik kontrolliert werden. Gleichzeitig soll dieses Item das weitergehende Denken des Probanden aufzeigen.

Allgemeine Abschlussfragen

Würden Sie sich wohl fühlen, wenn Sie auf der Arbeit von einem [solchen] Roboter unterstützt werden? (vgl. QA8, EK, 2012, S. 16)

Diese Frage ist als Kontrollfrage zur Gewöhnungsdauer zu sehen und soll das persönliche Wohlempfinden aufzeigen. Eine starke Zustimmung zum Wohlempfinden in dieser Frage sollte mit einer geringen Gewöhnungsdauer mit dem Versuchsroboter einhergehen.

Welcher Durchlauf war für Sie am angenehmsten? / Welcher Durchlauf war für Sie am unangenehmsten?

Diese zwei Fragen prüfen zusammenfassend das subjektive Empfinden des Probanden über die Versuchsreihe hinweg.

Ist Ihnen ansonsten etwas aufgefallen?

Dieser Abschnitt soll den Probanden für etwaige Bemerkungen und ein Fazit zur Verfügung stehen.

Antworten

Insgesamt enthält der Fragebogen 26 Items, die bis auf eine Abschlussfrage geschlossen gestellt sind, um eine gute Auswertbarkeit und Vergleichbarkeit zu erzielen. Die Fragen lassen sich in persönliche und versuchsbezogene Fragen unterteilen.

Im Bereich der personenbezogenen Daten wird aus vorgegebenen Antwortmöglichkeiten ausgewählt. Insbesondere bei diesen Fragen wurde auf große Antwortkorridore

geachtet, die in Zusammenarbeit mit dem zuständigen Datenschutzbeauftragten erstellt wurden.

Im Bereich der spezifischen Fragen wurde für die Antwortmöglichkeiten eine sechsstufige Skalierung gewählt, analog der deutschen Schulnoten. Diese liegt innerhalb der empfohlenen Größe und soll durch die gerade Anzahl die neutrale Antwortmöglichkeit einer ungeraden Skala eliminieren (siehe Abschnitt 3.2). Auf diese Weise soll die Tendenz der Probanden deutlicher erkennbar werden.

Für die Abfrage der Usability hingegen wird die klassische 20-stufige Antwortskala des NASA TLX Fragebogens verwendet.

4.3 Hauptversuch

Dieser Hauptversuch soll die gewonnenen Informationen aus der Literaturrecherche sowie die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen vereinen, um eine Empfehlung zur optimalen Gestaltung einer Mensch-Roboter-Kooperation zu geben.

Für diese Hauptuntersuchung wird ein dreigliedriges Vorgehen verwendet.

Zunächst wird das Blickverhalten der Probanden analysiert, welches einen Aufschluss über die Aufmerksamkeitsfokussierung oder eine mögliche Ablenkung geben soll. Darüber hinaus wird die Pupille genauer betrachtet. Diese kann durch die Mydriasis, die Pupillenerweiterung, Rückschlüsse auf einen Schreckmoment ermöglichen. Zuletzt sollen die gewonnenen Ergebnisse sowohl mittels kognitiver Zusammenhänge und einer Verknüpfung mit dem Fragebogen erläutert werden.

4.3.1 Hypothesen

Auf Basis der Forschungsfragen, ausgewählten Charakteristiken und der Detailplanung des Versuchsablaufs werden Hypothesen aufgestellt.

Die Versuche sollen zeigen, ob bewegte Teile im Allgemeinen von den Probanden fixiert werden, oder ob der Roboter einer besonderen Aufmerksamkeitsfokussierung unterliegt. Hierzu werden die bewegten Teile der MM-Anlage, wie Pneumatikzylinder und Schwerkrafttrutschen, mit dem Roboter verglichen.

H1.1: Das bewegte Werkstück wird im Herstellprozess gleichermaßen von den Probanden fixiert wie der bewegte Roboter.

Während des Eingabeprozesses und der Überwachung der MM-Anlage steht der Roboter still. Theoretisch sollte der Roboter erst fixiert werden, wenn er in Bewegung versetzt wird. Vorher sollte der Fokus der Probanden auf der Prozessüberwachung der MM-Anlage liegen.

H1.2: Die Fixationen auf den Roboter beginnen erst, wenn der Roboter seine Bewegung startet. Der stehende Roboter wird nicht fixiert.

Reich und Eyssel (2013, S. 124) zeigten, dass eine negative Einstellung oder Angst gegenüber Robotern zu einer Kontaktvermeidung führen, siehe Abschnitt 2.3.2. Der dritten Hypothese liegt die Vermutung zugrunde, dass ein Proband, der dementsprechend zögerlich an den Roboter herantritt, längere Zeit für die Entnahme der Dose benötigt.

H1.3: Die Dauer, von dem Erreichen des Übergabepunktes durch den Roboter, bis der Proband das Werkstück vom Roboter entgegennimmt, steht im direkten Zusammenhang mit der Dauer der Interaktion selbst.

Mit der vierten Hypothese soll geprüft werden, ob mit der Übergabe des Werkstücks eine Verschiebung der Aufmerksamkeit erfolgt. Sobald das Werkstück erfolgreich aus dem Robotergreifer entnommen wurde, ist die Versuchsaufgabe erfolgreich abgeschlossen und die Roboterbewegung irrelevant. Diese Hypothese soll prüfen, inwieweit eine zurückweichende Bewegung des Roboters den Probanden beeinflusst.

H1.4: Nach der Übergabe des Werkstücks liegt der Fokus nicht mehr auf dem zurückweichenden Roboter.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche mit insgesamt 40 Probanden erfolgt innerhalb von zwei Wochen. Die Probanden werden nacheinander in das Trainingscenter eingeladen, in dem sich der Versuchsaufbau befindet. Nach einer Erläuterung des Ablaufs erhalten die Probanden Anschreiben und Fragebögen und füllen zunächst den ersten Teil des

Fragebogens aus. Daraufhin erfolgt das Verkabeln und Kalibrieren des Eye-Tracking Systems.

Die MM-Anlage läuft nicht ganz störungsfrei. Direkt nach dem Start werden insgesamt zwölf Versuche abgebrochen, da die M&Ms auf der Schwerkrafrutsche verklemmen. Nur ein Abbruch ist auf eine Störung am Roboter zurückzuführen. Der Ablauf wird dann erneut von vorne gestartet.

Nach der erfolgreichen Versuchsdurchführung füllen die Probanden den zweiten Teil des Fragebogens aus und werden mit einem kleinen Präsent als Dankeschön für ihre Teilnahme aus dem Versuch entlassen.

Der Versuch ist derart aufgebaut, dass sich der Roboter zunächst nicht im Sichtfeld des Probanden befindet und sich erst in der Versuchsmitte in Bewegung setzt. Als Referenz und Normalzustand wird der Zeitraum betrachtet, in dem sich der Roboter im Blickfeld befindet, jedoch nicht bewegt. Alle Probanden sollen vor dem Versuch bereits mit dem System vertraut sein, um Lern- bzw. Gewöhnungseffekten während des Hauptversuchs vorzubeugen (vgl. Pfendler, 1990, S. 160).

Der Versuch lässt sich im Ablauf in die drei Phasen der Bestellung, Produktion und Roboterbewegung unterteilen. Für die Auslegung einer Mensch-Roboter-Kooperation ist der dritte Teil der Roboterbewegung besonders relevant, weshalb die einzelnen Bewegungen des Roboters in verschiedene Abschnitte untergliedert werden, siehe Abbildung 68.

Kürzel Roboterbewegung	Beschreibung
RAM	• Der Roboter bewegt sich von seiner Startposition zur Anlage, um die Dose aufzunehmen. Die Bewegung erfolgt quer zum Probanden.
RAP	• Von der Anlage aus bewegt sich der Roboter frontal auf den Probanden zu.
RAW	• Der Roboter wartet in großer Auslage auf den Start der Interaktion durch den Probanden.
RI	• Beginn durch ersten physischen Kontakt des Probanden mit dem Robotergreifer. Die Beendigung erfolgt mit der Öffnung des Greifers und Freigabe der Dose.
RAB	• Der Roboter steht still bis die Rückwärtsbewegung über den Ablauf eines Timers eingeleitet wird.
RABB	• Diese Phase beginnt mit dem Schließen des Robotergreifers und endet, wenn der Roboter seine ursprüngliche Basisposition erreicht hat.

Abbildung 68: Abkürzungen und Erläuterungen der Roboterbewegung

Diesen einzelnen Bereichen innerhalb der Bewegung des Roboters liegt der kreisförmige Bewegungsablauf zu Grunde, wie in Abbildung 67 (S. 129) vorgestellt.

4.3.3 Beobachtungen

Während des Versuchs werden Beobachtungen festgehalten, die Auffälligkeiten oder Besonderheiten darstellen. Die dargestellten Beobachtungen werden in der Auswertung zusätzlich zu den bereits gestellten Hypothesen untersucht.

Analog zu den Voruntersuchungen zeigt auch die Hauptuntersuchung Fixationen, die speziell auf den nächstgelegenen Punkt am Roboter gerichtet sind. Im Unterschied zu den Voruntersuchungen erlaubt die Hauptuntersuchung eine Bewegungsbahn in der die, bisher unberücksichtigte, orangefarbene Kappe des Roboters (Abbildung 69, rechts) den

nächstgelegenen Punkt darstellt. In dieser Konstellation wird die orangerote Kappe durch den Probanden ebenso wie der blaue Greifer (Abbildung 69, links) fixiert.



Abbildung 69: Blickfeld d. Probanden – Nahestehender Part des Roboters

Für die Entnahme der Dose aus dem Robotergrifer ist das Aufbringen von nach oben gerichtetem Druck gegen den Greifer erforderlich. Mit der Bewegung der Greifers nach oben, wandert gleichfalls der Fixationspunkt nach oben. Einige Probanden zeigen eine Auslenkung des Blicks (Abbildung 70, links), die über die tatsächliche Bewegung des Greifers hinausgeht, wodurch sich die Fixation über den Greifer hinaus verschiebt (Abbildung 70, rechts).



Abbildung 70: Blickfeld d. Probanden – Greiferöffnen

Die Hauptuntersuchung findet in einem Trainingsraum, mit großer Glasfläche zur Fahrstraße hin, statt. Auf dieser Straße bewegen sich verschiedene Fahrzeuge sowie

Personen per Fahrrad oder zu Fuß (Abbildung 71). Eine Aufmerksamkeitsverschiebung auf die Bewegung im Hintergrund der Versuchsanlage ist beobachtbar.



Abbildung 71: Blickfeld d. Probanden – Bewegungen im Hintergrund

Die vierzig Versuche finden über verschiedene Tage verteilt statt. In einigen Videos treten deutliche Lichtreflexionen auf dem Touchpanel der MM-Anlage und dem Roboter selbst auf, die teilweise direkt fixiert werden, siehe Abbildung 72.



Abbildung 72: Blickfeld d. Probanden – Fixationen auf helle Reflektionen

4.3.4 Auswertung

Für die Auswertung des Videomaterials werden verschiedene Kürzel verwendet.

Für die Beschreibung des Roboterzustands werden zusätzlich zu den Kurzformen aus Abbildung 68 folgende Zustände eingeführt, siehe Tabelle 1.

Kürzel Roboterzustand	Beschreibung
nR	Kein Roboter im Bild
rf	Roboter im Bild, unbewegt
RAD	Roboter in Störung

Tabelle 1: Abkürzungstabelle der Roboterzustände

Die Auswertung der Versuche beginnt mit der Verteilung der Fixationen auf die MM-Anlage über zunächst drei verschiedene Abschnitte des Versuchs, d. h. drei verschiedene Bewegungen des Roboters. Die Abschnitte, in denen sich der Roboter nicht (RF), quer zum Probanden (RAM) und frontal auf den Probanden zu (RAP) bewegt, zeigen erwartungsgemäß große Unterschiede in der Verteilung der Aufmerksamkeit des Probanden auf die MM-Anlage. Abbildung 73 zeigt die Verteilungen der Fixationen auf die MM-Anlage anteilig nach den Roboterbereichen RF, RAM und RAP. Solange der Roboter sich noch nicht bewegt (RF), liegt die Fixation auf die MM-Anlage im Median bei 75%, wobei es jedoch einige Ausreißer gibt. Dieser Anteil steht im deutlichen Kontrast zu den Versuchsabschnitten, in denen der Roboter in Bewegung versetzt wird.

Im ersten Zeitraum der Roboterbewegung (RAM, quer zum Probanden) sinkt die Fixation auf die MM-Anlage im Median auf ca. 7%. Auch hier gibt es Ausreißer nach oben mit einem Maximalwert von 72%. Während der Frontalbewegung des Roboters auf den Probanden zu (RAP) sinkt die Fixation auf die MM-Anlage weiter auf ca. 2,7% ab. Obwohl deutliche Ausreißer mit bis zu 52 % vorliegen, zeigt sich die Roboterbewegung RAP im Boxplot in einer kompakten Form.

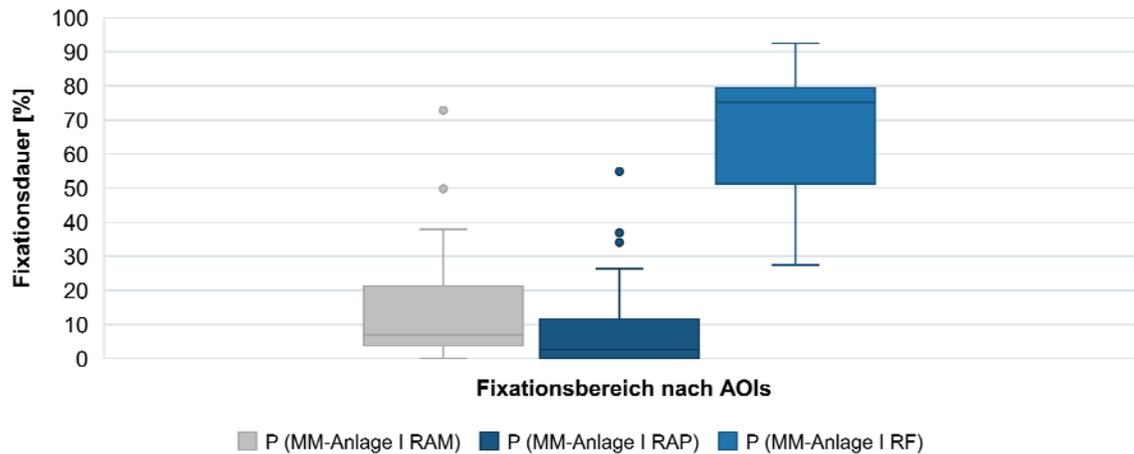


Abbildung 73: Verteilung der Fixationen auf RAM, RAP und RF

Die Fixationen auf die MM-Anlage sollen im Folgenden auf ihre Signifikanz geprüft werden. Als Referenz wird die Messreihe mit dem niedrigsten Median, die Bewegung des Roboters auf den Probanden zu (RAP), verwendet.

Zunächst werden die Messreihen mit bewegtem Roboter (RAP und RAM) miteinander verglichen. Dieser Vergleich soll zeigen, ob zwischen der Bewegung des Roboters quer zum Probanden (RAM) und frontal auf den Probanden zu (RAP) eine signifikante Änderung der Fixationen auf die MM-Anlage bestehen. Die Alternativhypothese besagt, dass eine solche signifikante Änderung vorliegt.

Ein Korrelationskoeffizient der beiden Werte von $r = 0,59$ weist zunächst auf einen linearen Zusammenhang zwischen den Roboterbewegungen RAP und RAM hin, siehe Tabelle 2).

Merkmal 1	Merkmal 2	ρ (rho)
P (MM-Anlage RAM)	P (MM-Anlage RAP)	0,59

Tabelle 2: Korrelationskoeffizient für die Fixationen auf die MM-Anlage

Der Vergleich der Mittelwerte zeigt für die Bewegung auf den Probanden zu (RAP) einen kleineren Wert (ca. 8,5%) als bei der Bewegung quer zum Probanden (RAM, ca. 14%). Die t-Statistik fällt dementsprechend negativ aus (Tabelle 3). Der Betrag der t-Statistik

liegt oberhalb des kritischen t-Wertes für einseitige Stichproben von 1,68, weshalb für diesen t-Vergleich der begründete Verdacht besteht, dass die Alternativhypothese nicht verworfen werden kann. Weiterhin wird daher der einseitige p-Wert mit dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ verglichen. Da der p-Wert für den Vergleich der Roboterbewegungen RAM und RAP kleiner ausfällt als der α -Wert von 0,05, kann die Nullhypothese nicht angenommen werden. Es kann somit von einem signifikanten Unterschied des Einflusses des Roboters zwischen einer Bewegung quer zum (RAM) und frontal auf den Probanden zu (RAP) ausgegangen werden.

Versuch	t-Statistik	P(T<=t) einseitig
Fixation auf Roboter (FR)	-2,5964	0,0067

Tabelle 3: t-Test für die Fixationen auf die MM-Anlage bei bewegtem Roboter

Ein weiterer t-Test für die Auswertung der Fixationen auf die MM-Anlage soll die Abweichungen der Fixationen zwischen dem stillstehenden Roboter (RF) und den beiden Bewegungsphasen (RAM und RAP) untersuchen. Die Nullhypothese verwendet dabei die Fixationen während des Roboterstillstandes als Referenz und besagt, dass die Fixationsanteile in den beiden Bewegungsphasen nicht signifikant abweichen. Die Alternativhypothese geht dementsprechend von einer Abweichung der Fixationsanteile in den Bewegungsphasen aus.

Für die beiden Paarvergleiche liegen die Werte der Korrelation sehr leicht im negativen Bereich: Die Korrelation von RF und RAM liegt bei $r = -0,08$, die von RAP und RF bei $r = -0,17$. Ein linearer Zusammenhang zwischen diesen Bewegungsformen liegt somit vermutlich nicht vor, siehe Tabelle 4.

Merkmal 1	Merkmal 2	ρ (rho)
P (MM-Anlage RF)	P (MM-Anlage RAP)	-0,17
P (MM-Anlage RAM)	P (MM-Anlage RF)	-0,08

Tabelle 4: Korrelationskoeffizient für die Paarvergleiche

Für beide Paarvergleiche liegt der Mittelwert der ersten Stichprobe (RF) mit ca. 67% deutlich über den Werten der Roboterbewegungen RAM (ca. 12%) und RAP (ca. 8,5%). Die t-Statistiken beider Vergleiche fallen dementsprechend positiv aus, wobei der Betrag des Vergleichs RF mit RAP etwas höher liegt, als der des Vergleichs von RF mit RAM. Da beide t-Statistiken deutlich oberhalb des kritischen t-Wertes liegen, besteht für beide Paarvergleiche ein begründeter Verdacht, dass die Nullhypothese nicht gestützt werden kann (Tabelle 5). Die Signifikanz dieses Verdachts wird daher zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ geprüft. Beide p-Werte sind sehr klein und liegen deutlich unterhalb des Signifikanzniveaus. Die Auswirkungen des Standardfehlers sind für diese beiden Tests daher sehr gering. Für den Vergleich der Fixationen auf die MM-Anlage zwischen stillstehendem Roboter einerseits und den beiden Bewegungsformen (RAM und RAP) andererseits kann somit von einer signifikanten Ablenkung ausgegangen werden. Demnach zeigt sowohl die frontale als auch die quer verlaufende Bewegung des Roboters eine signifikante Aufmerksamkeitsverschiebung zwischen der MM-Anlage und dem Roboter.

Bewegung des Roboters	t-Statistik	P(T<=t) einseitig
Quer zum Probanden (RAM)	12,8691	1,5615E-15
Frontal auf den Probanden zu (RAP)	15,1698	9,1637E-18

Tabelle 5: t-Test für die Fixationen auf die MM-Anlage

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Roboterbewegung und ihrer Auswirkungen, die bereits an dieser Stelle durch die unterschiedliche Verteilung der Fixation deutlich hervortreten.

Auswertung nach Roboterbewegung

Im Folgenden wird jeder einzelne Abschnitt der Roboterbewegung (siehe Abbildung 68 auf S. 139) separat ausgewertet und in die betrachteten AOIs aufgeteilt. Als Grundlage dient dabei der Referenzzustand RF, auf den die einzelnen Bewegungsformen des Roboters folgen. Die nachfolgenden Abbildungen sind derart aufgebaut, dass zu jedem

Bewegungsmuster zunächst ein Kreisdiagramm die Verteilung der Fixationen auf die einzelnen AOs darstellt. Darauf folgt eine Darstellung mittels Boxplot, die auf der vertikalen Achse die Anteile der Fixationen des jeweiligen Bereichs in % zeigt. Die horizontale Achse bildet die einzelnen AOs ab, die innerhalb der jeweiligen Roboterbewegung vom Probanden betrachtet wurden.

Referenzzustand zur Roboterbewegung: Prozessüberwachung der Anlage (RF)

Während der Roboter sich in der Ausgangsposition befindet, d. h. vor und nach dem Bewegungsablauf des Roboters, liegen ca. 79% der Fixationen auf der MM-Anlage (Abbildung 74). Die direkte Fixation der Dose im Prozess liegt bei weiteren ca. 10,5%. Der aufsummierten Prozessüberwachung können somit ca. 89% der Fixationen zugeordnet werden.

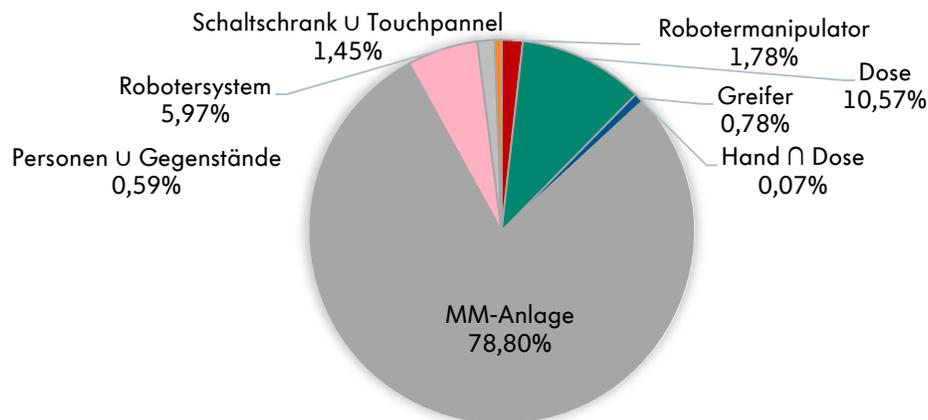


Abbildung 74: Referenzzustand, Prozessüberwachung (RF)
– Verteilung der Fixationen nach AOs

Während die Anlage sich im Prozess befindet und der Roboter steht, liegen lediglich 8,5% der Fixationen auf dem bewegungslosen Robotersystem inklusive des Manipulators und ca. 0,8% auf dem Greifer.

Als komplementärer Vergleich soll die Roboterbewegung frontal auf den Probanden zu dienen. Bei der frontalen Bewegung des Roboters liegen 10,5% der Fixationen auf der stehenden Anlage. Die Befürwortung von Hypothese 1.1 kann somit nochmals bekräftigt werden, denn die Anteile der Fixationen auf die MM-Anlage und dem Roboter können während der Bewegung und in den Phasen des Stillstands verglichen werden.

Ebenso wie in der Rückwärtsbewegung liegt bei Stillstand des Roboters ein größerer Fokus auf dem Roboter als auf dem Greifer. Die Fokussierung auf den Greifer weist jedoch drei Ausreißer auf, siehe Abbildung 75.

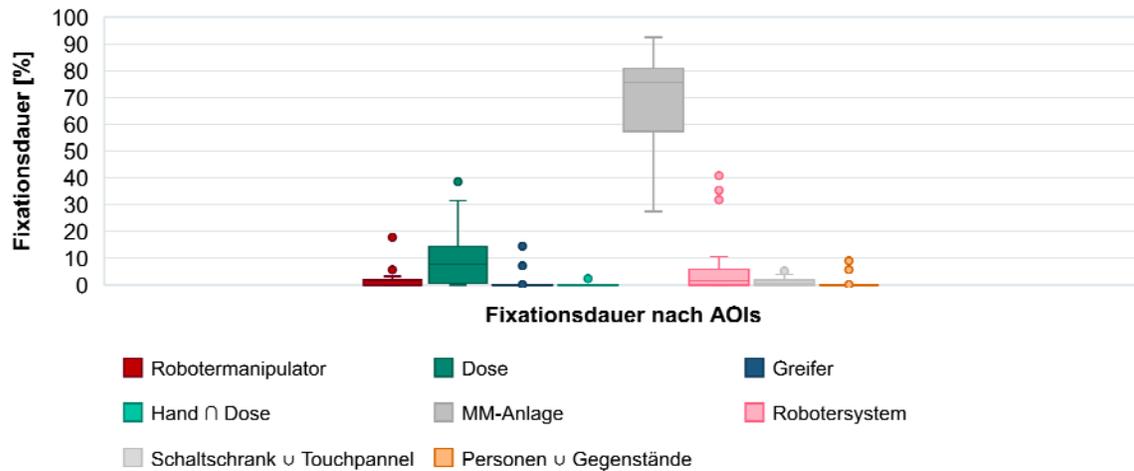


Abbildung 75: Referenzzustand, Prozessüberwachung der Anlage (RF)

Roboterbewegung 1: Bewegung quer zum Probanden (RAM)

Die Roboterbewegung startet mit dem Weg zur Anlage in einem annähernd rechten Winkel zum Probanden. Dieser Bewegungsabschnitt weist die gleichmäßigste Verteilung der Fixationen (höchster Median bei ca. 20%) während der Roboterbewegung auf. Der größte Blickanteil (ca. 30%) liegt auf dem Greifer, gefolgt vom Aufnahmeprozess (Greifer ∩ Dose, ca. 19%) und der zu überwachenden MM-Anlage (ca. 18%), siehe Abbildung 76.

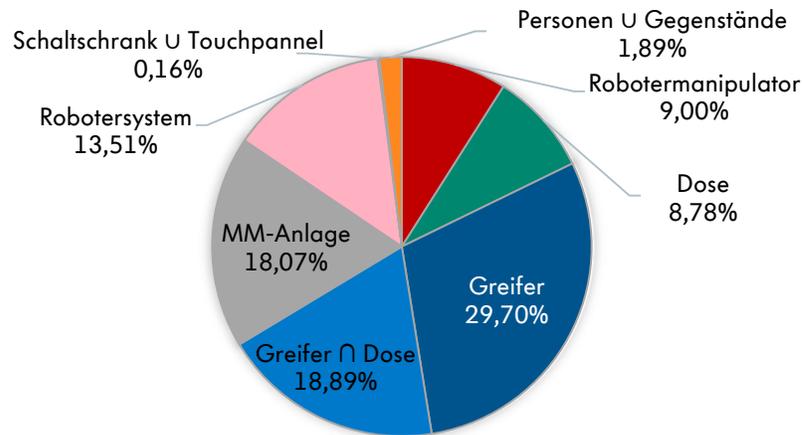


Abbildung 76: Bewegung quer zum Probanden (RAM)
– Verteilung der Fixationen nach AOIs

Der Bewegung des Roboters werden in dieser Auswertung zwei AOIs zugeordnet, der Roboterarmulator selbst und der Greifer, welcher sich am Endeffektor des Armes befindet. Die weiteren fünf AOIs beziehen sich auf die MM-Anlage und ihre Komponenten. Im ersten Bewegungsabschnitt des Roboters (RAM) werden den bewegten Teilen des Roboterarms ca. 30% der Fixationen auf dem Greifer sowie weitere ca. 9% auf dem Roboterarm zugeordnet. Zu insgesamt ca. 66% zeichnet sich somit die erste Bewegungsform des Roboters (RAM) durch Fixation auf den Roboter und seine Teile aus, die auf eine Vorbereitung der Probanden auf die kommende Aufgabe hinweisen.

Die Bewegung des Roboters im rechten Winkel zu den Probanden wird bereits in den Voruntersuchungen 2 und 3 betrachtet. In diesen Versuchsreihen konzentrierten sich die Probanden auf einen Fixpunkt neben dem Roboter und zeigten Ablenkungsreaktionen in Höhe von nur ca. 1% (Hüftbereich, größerer Abstand in VV2, siehe Abbildung 48) bei vergleichbarer Anordnung wie in diesem Abschnitt der Hauptuntersuchung. Die deutliche Steigerung der Ablenkungsreaktionen zu diesem Versuchsteil (RAM) lässt sich auf die Aufgabenstellung zurückführen. In Vorversuch 2 war eine strikte Fokussierung auf einen Fixpunkt gefordert. Diese steht im Hauptversuch zwar der Prozessüberwachung, jedoch auch der freien Blickführung gegenüber, die den Planungsblick bedingt.

Ebenso sind im Vergleich zum vorherigen Versuchsabschnitt, der Prozessüberwachung ohne eine Bewegung des Roboters, die Werte deutlich angestiegen (siehe Abbildung 75). In dieser Phase des Stillstands liegen die Fixationen zu ca. 2% auf dem stehenden Roboter und ca. 1% auf dem Greifer, aufsummiert können dem vollständigen Robotersystem (Plattform, auf der der Roboterarm montiert ist) somit ca. 6% zugeordnet werden. Die entsprechenden Versuchsreihen weisen eine leicht negative Korrelation aus ($r = -0,25$).

Dieser Sprung der Fixationen zwischen dem stehenden Roboter auf die bewegten Teile des Roboters lässt eine Befürwortung von Hypothese 1.2 zu.

Die Verteilung zeigt im Boxplot nochmals deutlicher ihre Homogenität mit nur wenigen Ausreißern, siehe Abbildung 77.

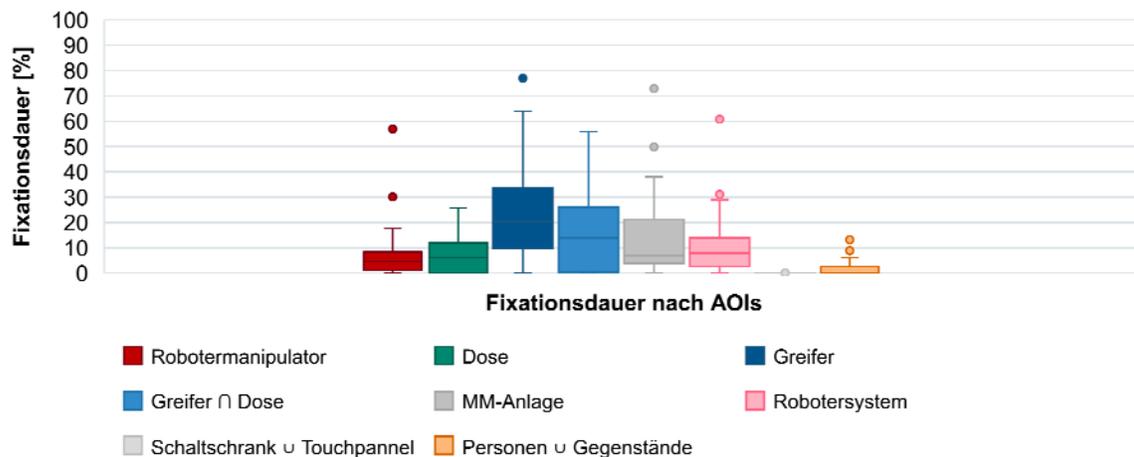


Abbildung 77: Bewegung quer zum Probanden (RAM)

Roboterbewegung 2: Bewegung frontal auf den Probanden zu (RAP)

Bei der Bewegung des Roboters frontal auf den Probanden zu, liegen ca. 73% aller Fixationen auf dem Greifer und der Dose (Abbildung 78). Der bewegte Roboterarm, der aus Sicht des Probanden hinter dem Greifer zu sehen ist, liegt bei einem Anteil von ca. 8,5%.

Die Betrachtung des hauptsächlichsten AOIs von ca. 73% lässt sich als Planungsblick werten, d. h. einen Blick, der einer Bewegung vorausgeht, da in dem darauffolgenden Bewegungsabschnitt die Interaktion eingeleitet wird.

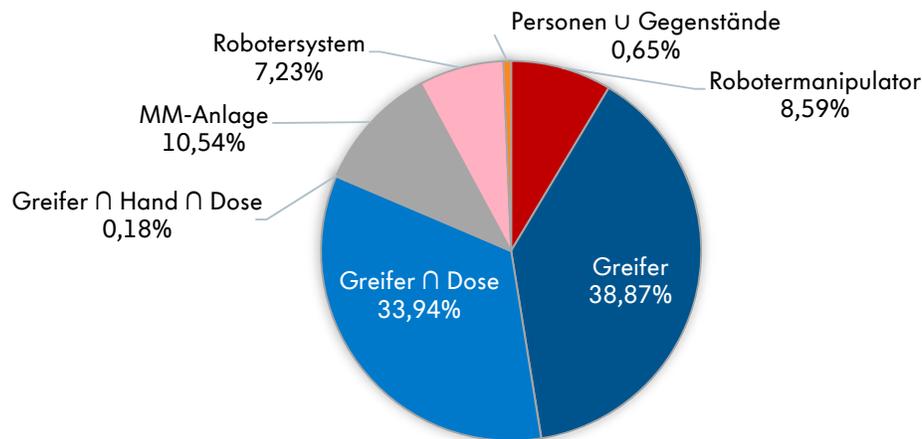


Abbildung 78: Bewegung frontal auf den Probanden zu (RAP)
– Verteilung der Fixationen nach AOIs

Dieser Wert lässt sich mit den Fixationen von ca. 79% auf dem laufenden Herstellprozess in der Anlage, während der Roboter stillsteht, vergleichen (siehe Abbildung 74). Die beiden Versuchsreihen zeigen eine deutliche Korrelation auf ($r = -0,41$, siehe Tabelle 6).

Merkmal 1	Merkmal 2	ρ (rho)
P(FMM RF)	P(FGD ∪ FG RAP)	-0,41

Tabelle 6: Korrelationskoeffizient für Hauptmerkmale von RF und RAP

Die Hypothese 1.1 kann somit bestätigt werden, der bewegte Roboter und die laufende Anlage zeigen eine ähnliche Höhe an Fixationsanteilen auf.

Als Gegenprüfung sollen an dieser Stelle zusätzlich die irrelevanten Bereiche der jeweiligen Versuchsabschnitte verglichen werden. Die MM-Anlage wird während der Bewegung des Roboters hin zu dem Probanden (RAP) zu ca. 10,5% fixiert. Die Fixationen auf das gesamte Robotersystem liegen im Zeitraum des MM-Prozesses bei 8,5%.

Die Fixationsdauern verändern sich insbesondere hinsichtlich des Greifers und der Dose zu einem heterogenen Bild und zeigen anhand der Ausreißer eine deutliche Unruhe in den Blickbewegungen, siehe Abbildung 79.

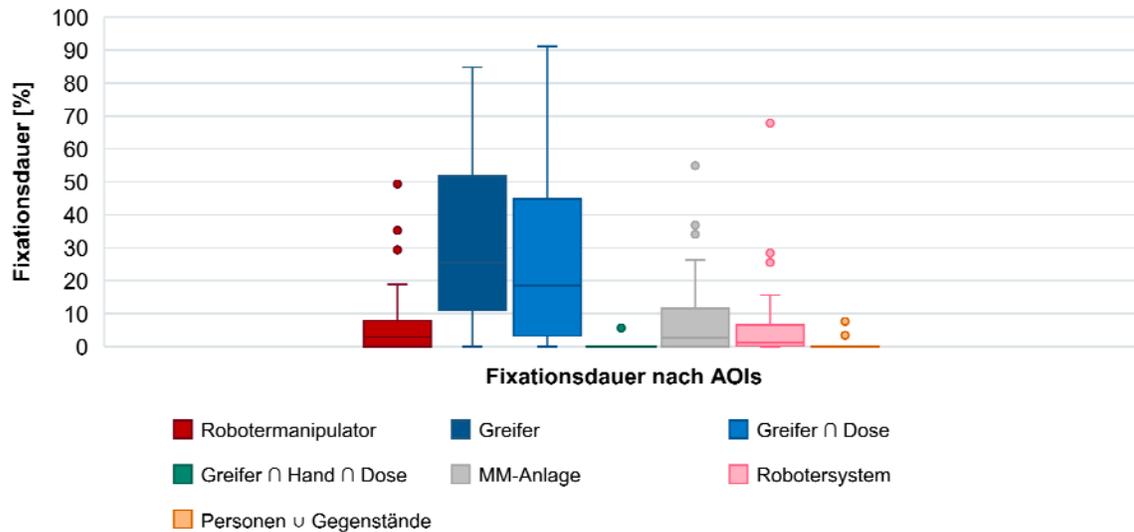


Abbildung 79: Bewegung frontal auf den Probanden zu (RAP)

Roboterbewegung 3: Wartezeit auf Interaktion durch Proband (RAW)

Der nächste Abschnitt zeigt die Wartezeiten des Roboters vor der Interaktion (RAW). Die Wartezeit beginnt, sobald der Roboter seine Endposition erreicht hat, d. h. er befindet sich während dieser Phase im Stillstand. Dies wird durch eine blaue Ringleuchte zwischen Roboterarm und Endeffektor signalisiert. Die Wartezeit wird beendet durch den ersten Kontakt des Probanden mit dem Robotergreifer.

Während dieser Wartezeit vor der Interaktion steigt die Fixation auf den Greifer (inklusive Dose und Hand) auf ca. 93%, siehe Abbildung 80.

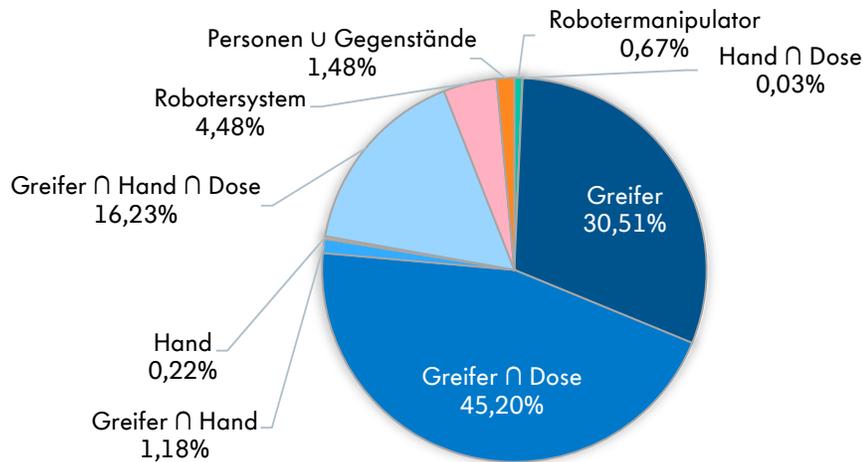


Abbildung 80: Wartezeit auf Interaktion durch Proband (RAW) – Verteilung der Fixationen nach AOIs

Die Fixationen auf die MM-Anlage sinken auf 0%.

Ein Proband weist eine Fixation auf den Greifer von ca. 99% auf (Abbildung 81). Ein solch hoher Wert zeigt deutlich, dass die Probanden Planungsblicke auf die für ihre zukünftige Handlung relevanten AOIs, nämlich der Dose, dem Greifer sowie ihrer Hand, durchführen.

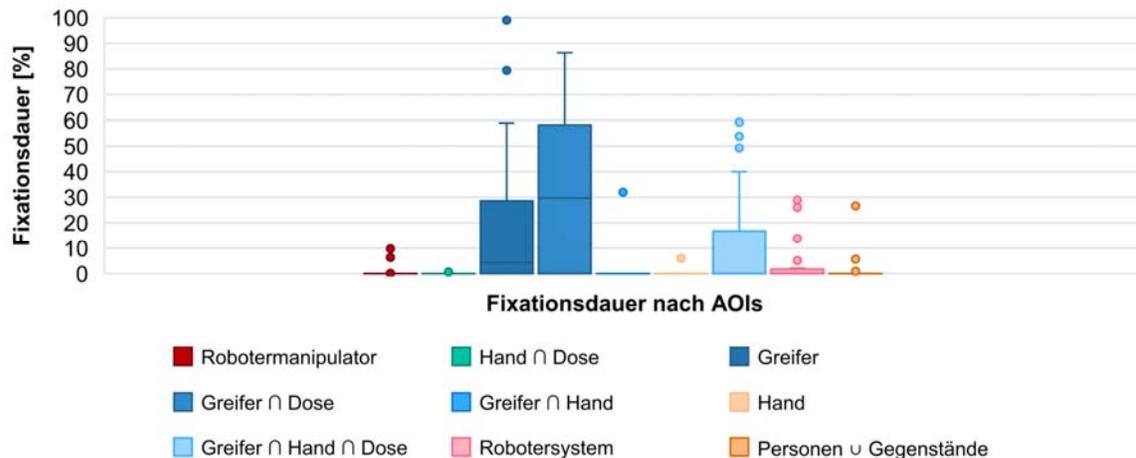


Abbildung 81: Wartezeit auf Interaktion durch Proband (RAW)

Roboterbewegung 4: Interaktion (RI)

Der nächste Bereich der Roboterbewegung zeigt die Interaktion. Dies ist der Abschnitt, in dem der Proband die Dose aus dem Greifer des Roboters entnimmt. Als Start dieses

Abschnitts wird der erste händische Kontakt des Probanden mit dem Greifer gewertet. Den Endpunkt der Interaktion stellt die erfolgreiche Signalübergabe an den Roboter dar. Diese erfolgt durch einen leichten Druck von unten gegen den Greifer, woraufhin der Greifer die Greiferbacken öffnet, sodass die Dose sich löst und für die Entnahme durch den Probanden freigegeben ist.

Die Verteilung der Fixationen liegt während der Interaktion zu ca. 91,5% auf dem Greifer (inklusive Dose und Hand), zu ca. 8% auf dem Robotersystem und zu ca. 0,4% auf der M&M-Anlage, siehe Abbildung 82.

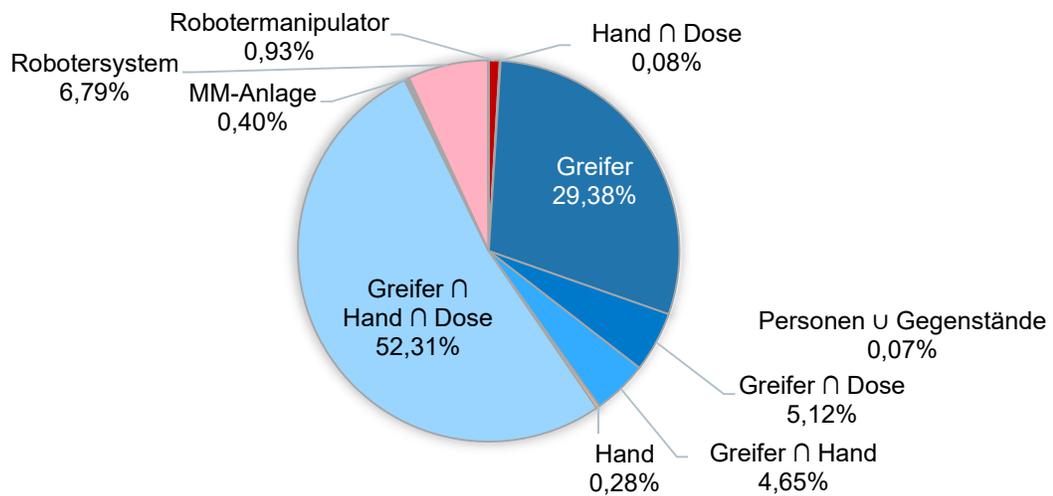


Abbildung 82: Interaktion (RI) – Verteilung der Fixationen nach AOIs

Der Boxplot zeigt die starke Verteilung auf dem kombinierten AOI von Greifer, Hand und Dose sowie deutliche Ausprägungen bei dem Greifer (Abbildung 83). Weiterhin liegen hohe Ausreißer, bei annähernd 100% in den Bereichen Greifer, Greifer mit Dose und Greifer mit Hand vor.

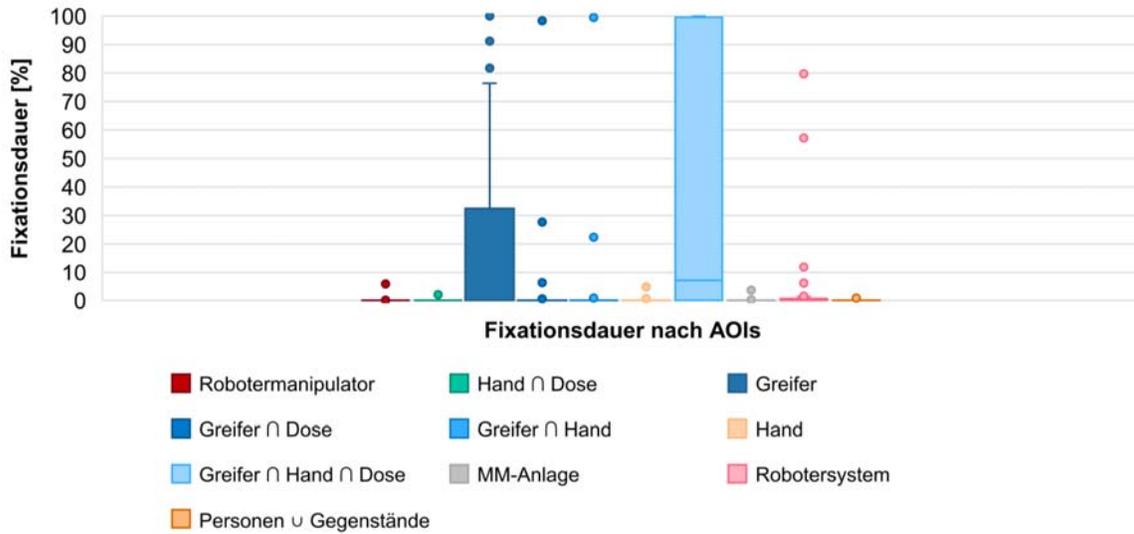


Abbildung 83: Interaktion (RI)

Roboterbewegung 5: Wartezeit zur Einleitung Rückwärtsbewegung (RAB)

Während der Wartezeit zur Einleitung Rückwärtsbewegung (RAB) verteilen sich die Fixationen wieder auf mehrere AOIs. Im Fokus liegen insbesondere die Dose mit Hand und Greifer (ca. 32%), der Greifer allein (ca. 30%) sowie der komplette Roboter Aufbau (ca. 27%), siehe Abbildung 84.

Der Anteil der Fixationen auf die Dose kann untergliedert werden in Fixationen auf den kombinierten AOI aus Dose, Hand und Greifer (ca. 17%), den AOI aus der Dose in der Hand (ca. 9%), der Dose im Greifer (ca. 3,5%) und der Dose allein (ca. 2,5%).

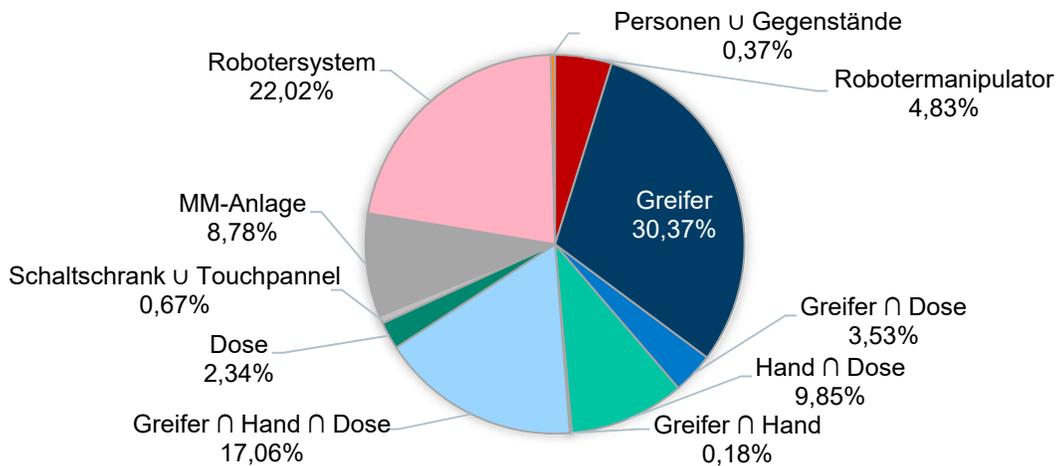


Abbildung 84: Wartezeit zur Einleitung Rückwärtsbewegung (RAB) – Verteilung der Fixationen nach AOIs

Die genauere Betrachtung des zeitlichen Ablaufs der Roboterwartezeit RAB zeigt, dass die Fixationen auf den Greifer direkt zu Beginn der Wartezeit erfolgen. Da die Bewegungsform RAB mit der Greiferöffnung beginnt, liegen erwartungsgemäß auch Fixationen auf den Greifer, während die Dose entnommen wird, vor. Daraufhin nehmen die Fixationen auf die Dose sowie auf die Roboterplattform (ca. 22%), weniger auf den Roboterarm (ca. 5%) zu, siehe Abbildung 85.

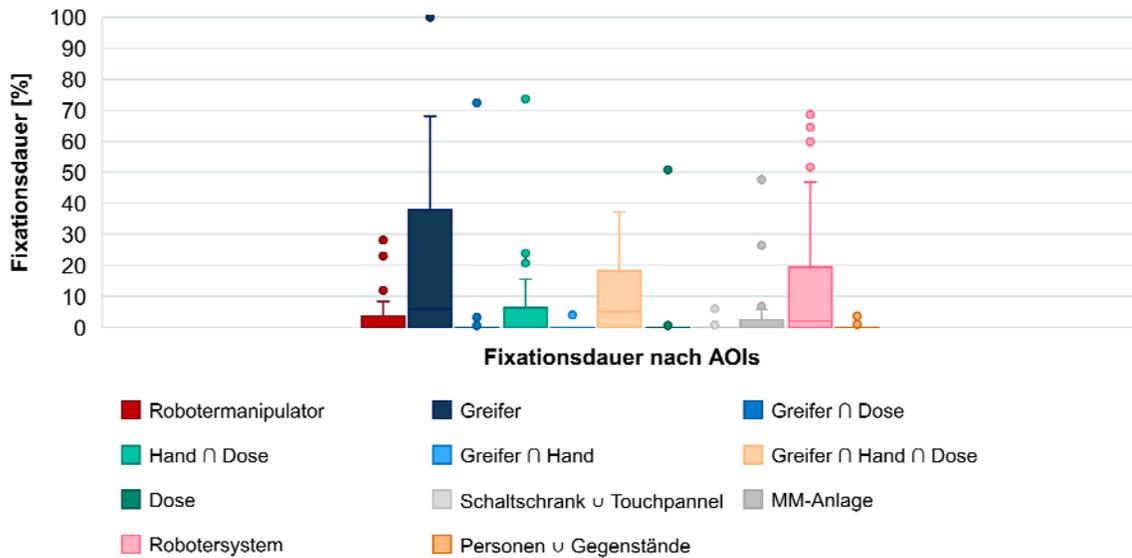


Abbildung 85: Wartezeit zur Einleitung Rückwärtsbewegung (RAB)

Roboterbewegung 6: Bewegung rückwärts, vom Probanden weg (RABB)

Die Rückwärtsbewegung betrachten nur 9 der 38 ausgewerteten Probanden. Die meisten Probanden wenden sich bereits vor Beginn der Rückwärtsbewegung vom Roboter ab, legen die Dose ab, betrachten das Robotersystem (ca. 51%) oder wenden sich der Versuchsorganisation zu, siehe Abbildung 86.

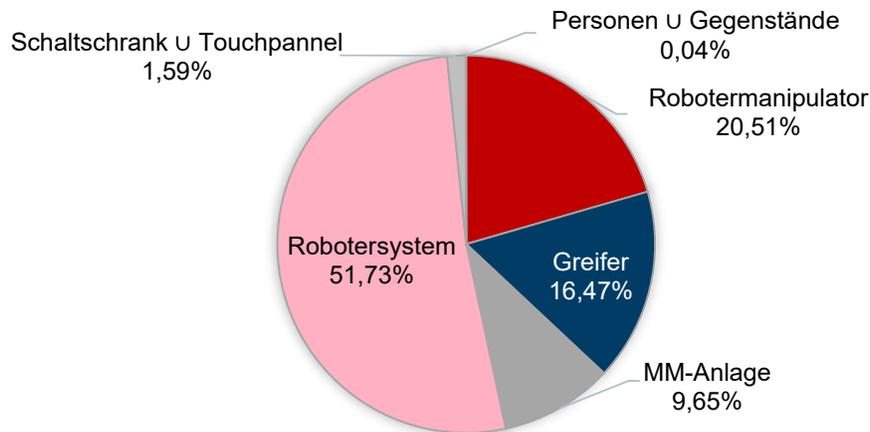


Abbildung 86: Bewegung rückwärts, vom Probanden weg (RABB) – Verteilung der Fixationen nach AOIs

Der Greifer des Roboters wird während der Rückwärtsbewegung erstmals nicht mit einer größeren Aufmerksamkeit (ca. 16,5%) betrachtet als der Roboter manipulator (ca. 20%). Lediglich der Ausreißer eines Probanden liegt oberhalb der Werte des Greifers (Abbildung 87). Nur 9 Probanden verfolgen den sich rückwärts bewegenden Roboter.

Die Hypothese H1.4, dass nach der Übergabe des Werkstücks der hauptsächliche Fokus nicht mehr auf dem zurückweichenden Roboter liegt, ist somit belegt.

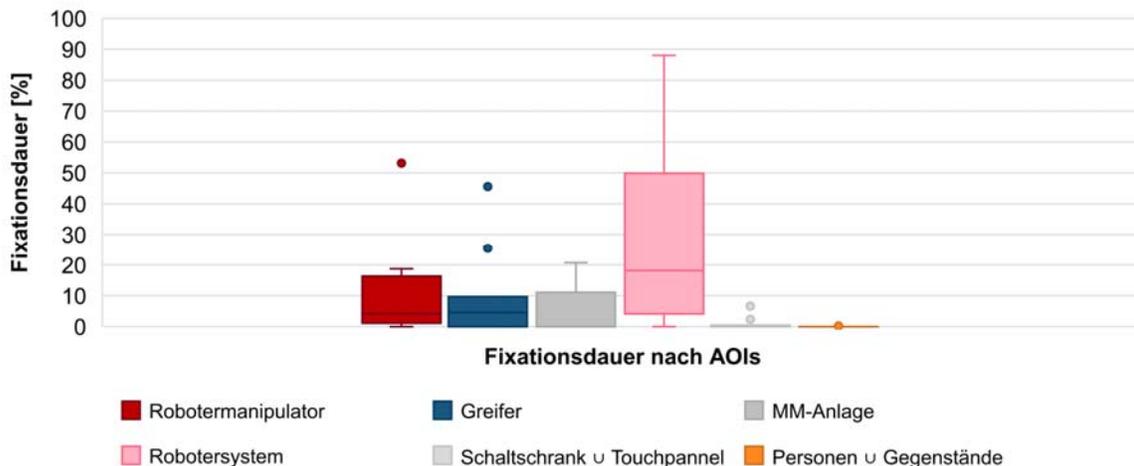


Abbildung 87: Bewegung rückwärts, vom Probanden weg (RABB)

Die Rückwärtsbewegung (RABB) endet mit dem Erreichen der Ausgangsposition, von welcher aus der Roboter im nächsten Zyklus seine Bewegung erneut startet.

Differenzwertbetrachtung

Für die vorgestellten Bewegungsmuster muss von einer direkten Abhängigkeit der Werte untereinander ausgegangen werden. Ein Indiz hierfür sind hohe Korrelationswerte, die für viele Vergleiche zwischen $r = 0,6$ und $r = 0,9$ liegen.

Um eine wahrscheinliche gemeinsame Varianz und insbesondere den Standardfehler nicht zweifach zu berücksichtigen, werden die Bewegungsformen des Roboters mittels Differenzwerten analysiert. Als Datengrundlage der Differenzwertmethode dienen die arithmetischen Mittel der einzelnen Verteilungen, die daher zunächst betrachtet werden (siehe Abbildung 88).

Als Basis für die Messwertpaare dient die homogene und annähernd normalverteilte Bewegung des Roboters quer zum Probanden (RAM) mit dem zweitniedrigsten Mittelwert über die einzelnen AOIs von ca. 4,5%. Die Bewegung des Roboters vom Probanden weg (RABB) weist zwar einen geringeren Mittelwert (ca. 4,5%) als die Bewegung quer zum Probanden (RAM) auf (ca. 4,6%), wird aufgrund der geringen Messwerte von $n = 9$ an dieser Stelle jedoch nicht als Referenz verwendet.

Ein niedriger Mittelwert steht an dieser Stelle für eine gleichmäßige Verteilung der Fixationen auf mehrere AOIs, wobei keiner der AOIs eine besonders hohe Ausprägung zeigt.

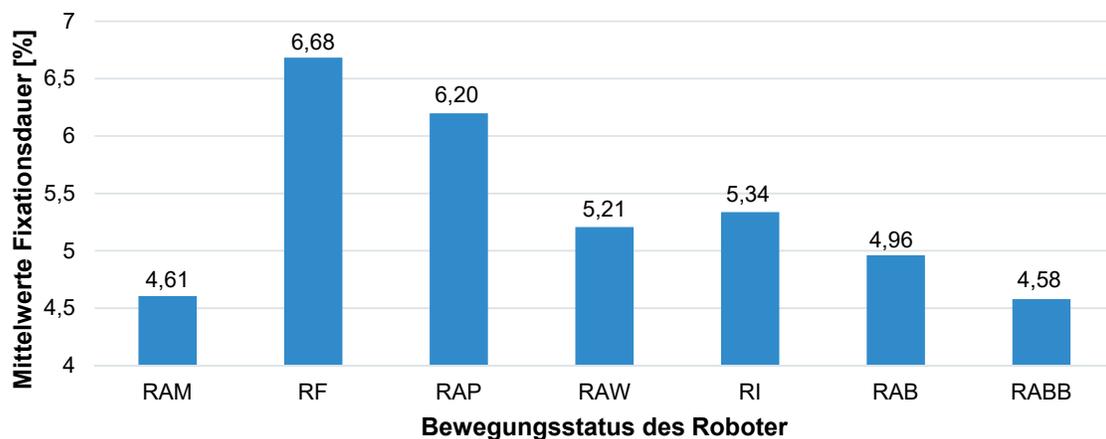


Abbildung 88: Vergleich der Mittelwerte des Roboterstatus

Den höchsten Mittelwert der Fixationen auf den AOIs weist der stillstehende Roboter (RF) auf, wobei sich die Fixationen größtenteils auf die MM-Anlage beziehen (siehe Abbildung 77). Den zweithöchsten Wert zeigt die Bewegung frontal auf den Probanden zu (RAP), während der sich der Proband stark auf den Robotergreifer und die Dose konzentriert (siehe Abbildung 79). Zur Wartezeit auf die Interaktion (RAW, Abbildung 81) sinkt der Mittelwert deutlich ab und nimmt zur Interaktion (RI, Abbildung 83) nur minimal zu. Während der zweiten Wartezeit im Prozess, der Einleitung auf die Rückwärtsbewegung (RAB, Abbildung 85) und der darauffolgenden Rückwärtsbewegung (RABB, Abbildung 87) sinken die Mittelwerte bis knapp unter den Referenzmittelwert.

Dargestellt als Differenzwerte ergibt sich folgende Verteilung der Differenzwertpaare, siehe Abbildung 89.

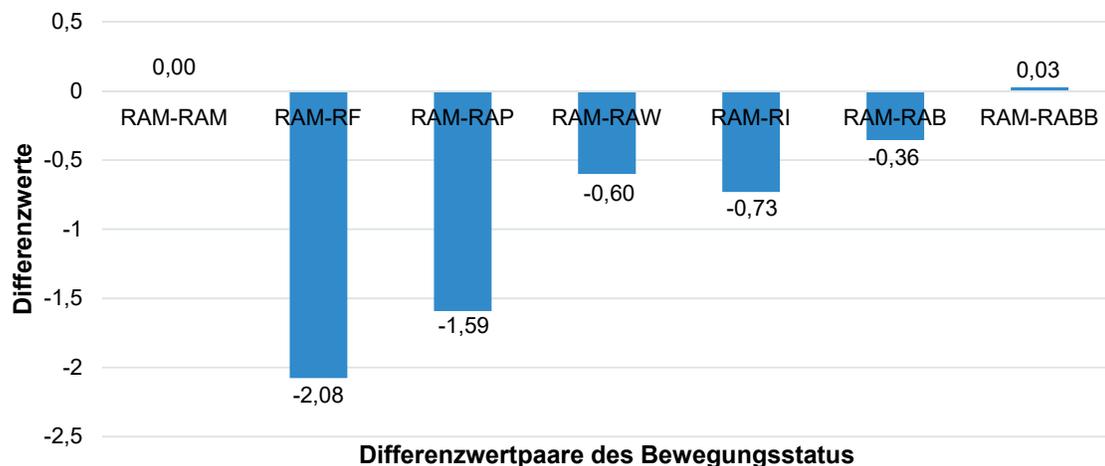


Abbildung 89: Differenzwertpaare des Bewegungsstatus

Der Differenzwertpaarvergleich zeichnet sich durch 11 Freiheitsgrade aus, der kritische t-Wert liegt bei 1,796.

Die t-Statistiken aller Differenzwertpaare liegen leicht im positiven Bereich. Somit gilt für alle Messwertpaare, dass der Referenzmittelwert von RAM mit 4,99 größer als die Mittelwerte der einzelnen Differenzwerte ist. Die Beträge der t-Statistiken liegen in zwei Fällen unterhalb des kritischen t-Wertes (RF und RI) und in den weiteren vier Paarvergleich oberhalb des kritischen Wertes von 1,796, siehe Tabelle 7.

Versuch	t-Statistik	P(T<=t) einseitig
Stillstehender Roboter (RF)	1,2722	0,1148
Bewegung auf Probanden zu (RAP)	2,0868	0,0305
Wartezeit auf Interaktion (RAW)	1,8864	0,0429
Interaktion (RI)	1,7882	0,0506
Wartezeit auf Rückwärtsbewegung (RAB)	3,2535	0,0038
Rückwärtsbewegung (RABB)	2,9160	0,0070

Tabelle 7: t-Test für die Differenzwertpaare der Robotermodi

Zunächst werden die Statistiken der beiden niedrigeren t-Werte untersucht, die den Verdacht nahelegen, dass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann. Die p-Werte der beiden Differenzwertpaare liegen oberhalb des Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$. Der Standardfehler der Messwertpaare darf somit nicht vernachlässigt werden. Die Höhe der Fixationsmittelwerte von RF und RI weichen somit nicht signifikant von der Bewegung des Roboters quer zum Probanden ab.

Die übrigen vier Roboterbewegungen RAP, RAW, RAB und RABB weisen t-Werte oberhalb des kritischen Wertes aus. Der niedrigste t-Wert zeigt sich in der Differenzverteilung der Wartezeit auf Interaktion (RAW) und der höchste t-Wert in der Wartezeit auf die Rückwärtsbewegung (RAB). Aufgrund der t-Werte oberhalb des kritischen t-Wertes muss für diese Bewegungsmodi von der Möglichkeit der Verwerfung der Nullhypothese ausgegangen werden. Dieser Verdacht wird durch den Vergleich der p-Werte zum Signifikanzniveau α von 0,05 bestätigt. Für alle vier Messwertpaare liegt der errechnete p-Wert leicht unterhalb des α -Werts. Für die Bewegung auf den Probanden zu (RAP), die Wartezeiten auf Interaktion (RAW) und Rückwärtsbewegung (RAB), sowie die Rückwärtsbewegung selbst (RABB) kann somit die Alternativhypothese angenommen werden. Es besteht eine signifikante Änderung der Fixationsdauern zwischen der Referenzbewegung quer zum Probanden und den einzelnen Areas of Interest RAP, RAW, RAB und RABB. Die Verteilung der Aufmerksamkeit unterscheidet sich in diesen vier signifikanten Bereichen deutlich von

der Verteilung während der Referenzbewegung (RAM). Die Referenzbewegung des Roboters quer zum Probanden (RAM) zeichnet sich durch eine Verteilung der Fixationen auf insgesamt acht AOIs aus, wobei keiner dieser AOIs einen Fixationsanteil von mehr als 30% erhält.

Im Gegensatz zu der annähernd normalverteilten Aufstellung in der Referenzbewegung RAM liegt für die Bewegung auf den Probanden zu (RAP) beispielsweise eine eindeutige Fokussierung des Greifers und der Dose vor (aufsummiert 75,7%). Während der Wartezeit (RAW) wird diese Fokussierung um die Hand des Probanden erweitert. Dieses Phänomen wurde bereits durch den vorausschauenden Planungsblick des Probanden erklärt. Innerhalb des Versuchsaufbaus finden die beiden Bewegungsformen RAP und RAW frontal vor dem Probanden statt. Eine intelligente Bahnplanung des Roboters könnte diese beiden signifikanten Bewegungsbahnen deutlich reduzieren. Hierfür müsste sich der Roboter in Abhängigkeit des interagierenden Menschen bewegen und Frontalbewegungen beispielsweise nur bei größerem Abstand zwischen den Interaktionspartnern durchführen.

In der Wartezeit auf den letzten Bewegungsabschnitt (RAB) und der Rückwärtsbewegung (RABB) reduzieren sich die Fixationen von zwölf auf acht AOIs. Dabei verteilt sich die Aufmerksamkeit zunehmend auf das gesamte Robotersystem (51,7%). Die im t-Test als signifikant eingestufte Veränderung des Blickverhaltens basiert für die Bewegungsformen RAB und RABB auf einer reduzierten Fokussierung auf der Roboterbewegung. Die beiden Bewegungsformen wirken somit weniger aufmerksamkeitsfokussierend als die Referenzbewegung RAM und werden als neutral eingestuft.

Hintergrundbewegungen

Die Auswertung der Hintergrundbewegungen zeigt, dass in ca. 33% des Bildmaterials Bewegungen durch Personen oder Gegenstände (z.B. Stapler, Fahrzeuge oder Anhänger) zu sehen sind. Diese Bewegungen werden zu ca. 3,5% von den Probanden fixiert. Bezogen auf das Gesamtmaterial liegt der Ablenkungsanteil durch Bewegungen im Hintergrund bei ca. 1%.

Für die Auswertung der Hintergrundbewegungen werden die folgenden Abkürzungen eingeführt, siehe Tabelle 8.

Kürzel Hintergrund	Beschreibung
HKB	Hintergrund: keine Bewegung
HMO	Hintergrund: Mensch outside
HGO	Hintergrund: Gegenstand / Fahrzeug outside
HGMO	Hintergrund: Gegenstand + Mensch outside
HMI	Hintergrund: Mensch inside
HGI	Hintergrund: Gegenstand / Fahrzeug inside

Tabelle 8: Abkürzungstabelle für die Hintergrundbewegungen

Die Abbildung 90 und Abbildung 91 zeigen die Verteilungen der Fixationen auf die drei relevantesten AOIs, dem Greifer, dem Roboterarm und der MM-Anlage als Anteile des Gesamtversuches. Abbildung 90 zeigt die Fixationsdauer für diese Bereiche während gleichzeitig eine Bewegung im Hintergrund stattfindet. Abbildung 91 zeigt vergleichsweise die gleichen AOIs während im Hintergrund keine Bewegung stattfindet.

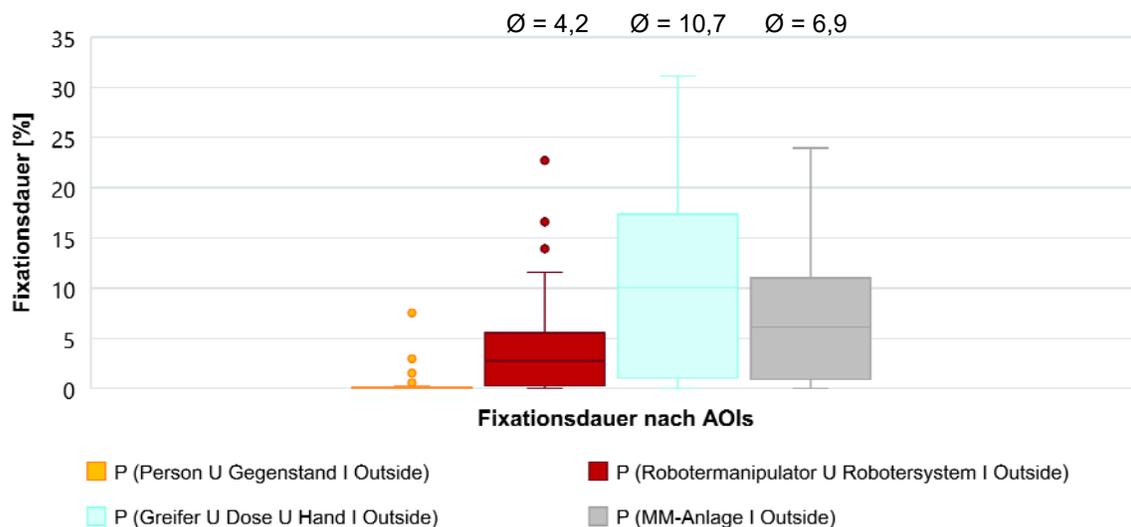


Abbildung 90: Verteilung der Fixationen mit Hintergrundbewegungen

Die Fokussierung auf eine Person oder einen Gegenstandes bedingt die gleichzeitige Bewegung im Hintergrund, weshalb nachfolgend nur drei AOIs aufgezeigt werden.

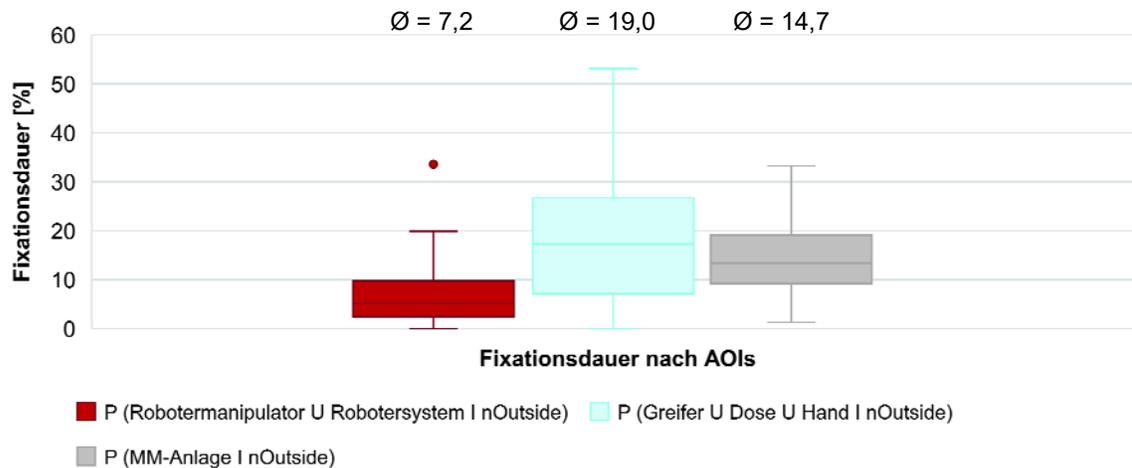


Abbildung 91: Verteilung der Fixationen ohne Hintergrundbewegungen

Alle drei AOIs zeigen einen leicht niedrigeren Mittelwert bei der Verteilung mit Bewegungen im Hintergrund. Aus jedem dieser drei AOIs fanden somit Fixationen auf die Hintergrundbewegungen statt. Weiterhin reduziert sich die Anzahl der Ausreißer erheblich.

Diese Anteile der Fixationen auf den AOIs sollen auf einen korrelativen Zusammenhang hin untersucht werden. Für diesen Zweck werden die Merkmale der Fixation auf dem jeweiligen AOI (Robotermanipulator, Greifer und MM-Anlage) paarweise nach ihrem Auftreten mit und ohne Hintergrundbewegung verglichen. Die Vergleiche für den Greifer ($r = -0,13$) und den Robotermanipulator ($r = -0,16$) weisen annähernd keinen linearen Zusammenhang auf. Der paarweise Vergleich der Fixationen auf die MM-Anlage weist mit $r = -0,56$ auf einen deutlichen negativen Zusammenhang hin, siehe Tabelle 9.

Merkmal 1	Merkmal 2	ρ (rho)
P(Greifer U Dose U Hand I Outside)	P(Greifer U Dose U Hand I nOutside)	-0,13
P(Roboter manipulator U Robotersystem I Outside)	P(Roboter manipulator U Robotersystem I nOutside)	-0,16
P(MM-Anlage I Outside)	P(MM-Anlage I nOutside)	-0,56

Tabelle 9: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der Hintergrundbewegungen

Dies bedeutet, dass die Probanden sich bei der Betrachtung der MM-Anlage deutlich stärker von Hintergrundbewegungen haben ablenken lassen als bei Fixationen auf Greifer oder Manipulator. Der negative Korrelationskoeffizient besagt dabei, dass die Fixationen auf die MM-Anlage umso niedriger ausfallen, desto mehr Bewegung im Hintergrund stattfindet (und umgekehrt).

Die Werte wurden weiterhin mittels t-Test auf ihre Signifikanz geprüft. Die Nullhypothese besagt dabei, dass keine Veränderungen in den Reaktionen vorliegen. Die Alternativhypothese beschreibt hingegen, dass sich die Bewegungen im Hintergrund des Versuchs auf die Reaktionen auswirken. Die t-Werte in allen drei Paarvergleichen liegen im negativen Bereich, d. h. der erste Mittelwert ist kleiner als der zweite Mittelwert, somit könnte ein positiver Effekt vorliegen und die Nullhypothese abzulehnen sein. Der Betrag der t-Statistik fällt in allen drei Fällen größer aus, als der kritische t-Wert von 1,687 (Tabelle 10). Somit besteht für die drei Vergleiche eine Grundlage, die Nullhypothese zu verwerfen und davon auszugehen, dass die Menschen und Gegenstände im Hintergrund der Aufnahmen einen Einfluss auf die Blickbewegung der Probanden ausüben. Ebenso liegen die p-Werte unter 0,05, somit kann auch auf Basis des P-Wertes und des α -Niveaus die Alternativhypothese nicht verworfen werden. Für die drei Bereiche Roboter, Greifer und MM-Anlage ist somit von einer signifikanten Ablenkung durch Personen und bewegte Gegenstände im Hintergrund auszugehen.

Versuch	t-Statistik	P(T<=t) einseitig
Fixation auf Roboter (FR)	-2,0026	0,0263
Fixation auf Greifer (FG)	-2,9503	0,0027
Fixation auf MM-Anlage (FMM)	-3,5601	0,0005

Tabelle 10: t-Test für Ablenkung durch Hintergrundbewegungen

Pupillendurchmesser

Als weiteres Merkmal der Konzentration wird der Pupillendurchmesser herangezogen und in Abbildung 92 über die einzelnen Versuchsabschnitte hinweg dargestellt. Der Pupillendurchmesser liegt im Mittel über alle Versuchsreihen bei ca. 3,9 mm.

Die geringste Streuung und den geringsten Median weist dabei der Versuchsabschnitt auf, bei dem der Roboter sich nicht im Blickfeld (nR) befindet. Die zweitniedrigsten Werte gehören in den Versuchsteil, in dem der Roboter stillsteht (RF).

Der höchste Wert, im Mittel ca. 4,4 mm und die größte Steuerung sind der Phase der Interaktion mit dem Roboter (RI) zuzuordnen. Dies lässt sich auf die nahe Fokussierung zurückführen, die mit einer Mydriasis (maximale Pupillenerweiterung) einhergeht (siehe Anhang 2).

Dieser Höchstwert des Pupillendurchmessers wird von den beiden Phasen gefolgt, die direkt vor (RAW) und direkt nach (RAB) der Interaktion stattfinden.

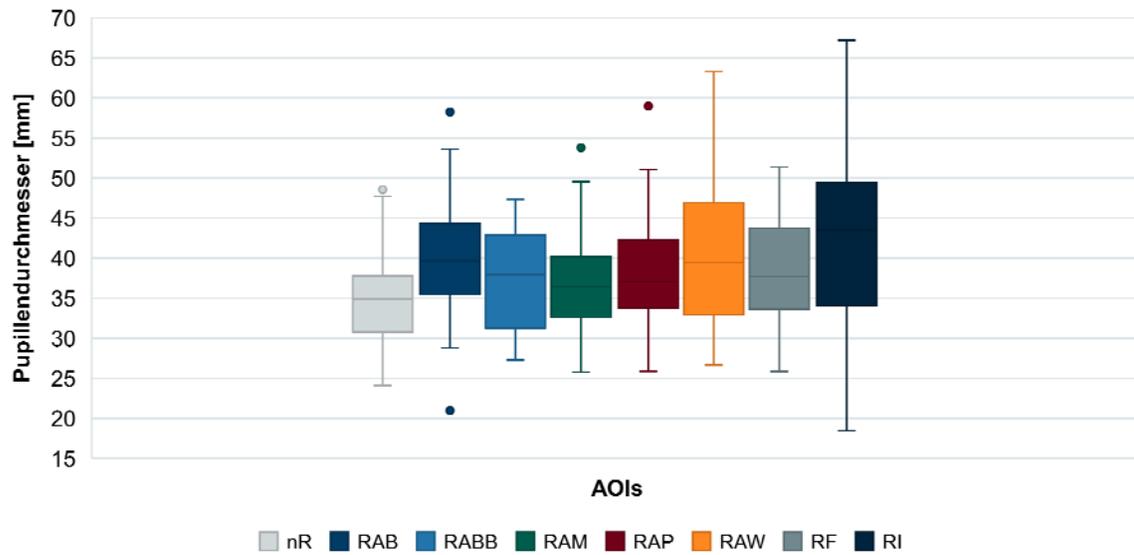


Abbildung 92: Pupillendurchmesser über die Versuchsabschnitte hinweg

Ein möglicher Zusammenhang der Messreihen wird zunächst auf Korrelation geprüft. Die Vergleiche zeigen teilweise starke lineare Zusammenhänge, wie die Wartezeit (RAW) und die Bewegung frontal auf den Probanden zu (RAP), die Stillstandszeit des Roboters (RF) mit der Wartezeit auf eine rückwärtige Bewegung (RAB) sowie die Wartezeit (RAW) und die Interaktionsphase (RI), siehe Tabelle 11.

Referenzbewegung	Vergleichsbewegung	Korrelationswert [r]
Wartezeit (RAW)	Bewegung frontal (RAP)	0,677
Stillstandszeit (RF)	Wartezeit rückw. Bewegung (RAB)	0,633
Wartezeit (RAW)	Interaktionsphase (RI)	0,698

Tabelle 11: Korrelationen der Pupillendurchmesser

Aufgrund dieser hohen Korrelationswerte soll die Signifikanz der Pupillendurchmesser untersucht werden. Als Referenz in der Nullhypothese dient die Phase des Versuchs

ohne Roboter (nR). Die Alternativhypothese besagt, dass die Bewegung des Roboters eine signifikante Änderung des Pupillendurchmessers hervorruft.

Der t-Test wird zunächst mit den beiden im Median stark abweichenden Bewegungsbahnen durchgeführt (RI und RAW, Tabelle 12). Beide Vergleichsreihen weisen einen negativen t-Wert aus, die Referenzreihe weist im Mittel einen kleineren Pupillendurchmesser als die Vergleichsreihen auf. In beiden Fällen liegt der Betrag des t-Wertes leicht unter dem kritischen t-Wert von 1,687. Weiterhin liegen die p-Werte der Vergleichsreihen leicht über dem Signifikanzniveau α von 0,05. Daher muss davon ausgegangen werden, dass der Effekt innerhalb des Standardfehlers liegt und die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann.

Eine Änderung des Pupillendurchmessers bei Bewegung des Roboters konnte in diesen Messreihen statistisch nicht nachgewiesen werden. Die Alternativhypothese ist unzutreffend.

Roboterbewegung	t-Statistik	P(T<=t) einseitig
Interaktion mit Roboter (RI)	-1,5438	0,0656
Wartezeit vor Interaktion (RAW)	-1,4117	0,0832

Tabelle 12: t-Test für den Pupillendurchmesser

Da für diese Messwertpaare, welche die stärksten Abweichungen aus der Messreihe darstellen, keine Signifikanz aufgezeigt werden kann, wird auf den Beweis der nicht vorhandenen Signifikanz der weiteren Messpaare an dieser Stelle verzichtet.

Außerdem wird der Zusammenhang zwischen einem langsamen ängstlichen Herantreten an den Roboter und der Interaktionsdauer betrachtet. Zwischen der Dauer, bis der Proband die Interaktion beginnt (RAW) und Dauer der Interaktion selbst (RI) kann jedoch keine Wechselwirkung festgestellt werden. Diese Messreihen zeigen keine Korrelationswirkung ($\rho = 0,14$), weshalb keine Anhaltspunkte bestehen, Hypothese H.1.3 weiter zu verfolgen, siehe Tabelle 13.

Merkmal 1	Merkmal 2	ρ (rho)
P(Dauer I RAW)	P(Dauer I RI)	0,14

Tabelle 13: Korrelationskoeffizient für den zeitlichen Vergleich von RAW und RI

Auswertung des Fragebogens

Die Probanden der Hauptuntersuchung setzen sich aus 31 Männern und 9 Frauen zusammen, die im Durchschnitt 38 Jahre alt sind. Neun der Probanden sind aktuell in der direkten Produktion beschäftigt, 25 der Probanden waren bereits in der direkten Produktion tätig.

Die Probanden sind im Mittel sehr an technologischen Entdeckungen interessiert (Frage 7: $\bar{x} = 5,47 / 6$). Der Boxplot zeigt jedoch zwei Ausreißer mit geringerer Zustimmung (Abbildung 93).

Im Vergleich zu dem technischen Interesse liegen die praktischen Erfahrungen der Probanden mit neuen Technologien und Robotern in etwas geringerem Umfang vor (Frage 9: $\bar{x} = 4,15 / 6$).

Die Probanden des Versuchs definieren mit einem Score $\bar{x} = 5,60 / 6$ den klassischen Industrieroboter hinter einem Schutzzaun als ihr Bild eines Roboters. Der Staubsaugroboter als Beispiel für die Servicerobotik erhält ebenso eine gute Zustimmung, diese liegt jedoch einen knappen Punkt unterhalb der des klassischen Industrieroboters (Frage 8.2: $\bar{x} = 4,63 / 6$). Der Staubsaugroboter zeigt einen Ausreißer mehr als der Industrieroboter. In beiden Fällen liegen die Ausreißer im niedrigen Bereich. Der Ausreißer mit der geringsten Zustimmung, den der Boxplot für den Staubsaugroboter ausweist, liegt bei Wert 1.

Im letzten Item dieses Fragebogenteils geben 80% der Probanden an, dass sie ein positives Bild von einem Roboter haben (Frage 10: $\bar{x} = 4,78 / 6$). Diese Zustimmung liegt leicht unterhalb des europäischen Mittelwerts von 88% (siehe Abschnitt 2.3.2).

- Frage 7: Bitte sagen Sie mir, ob Sie an wissenschaftlichen Entdeckungen und technologischen Entwicklungen interessiert sind.
- Frage 8.1: Ich zeige Ihnen nun zwei Bilder. Bitte sagen Sie mir zu jedem Bild, inwieweit dieses Ihrer Vorstellung vor Robotern entspricht. Bild 1.
- Frage 8.2: Bild 2.
- Frage 9: Nutzen Sie derzeit oder haben Sie jemals solche Roboter zu Hause oder am Arbeitsplatz genutzt? Falls Ja: Sind diese Erfahrungen positiv?
- Frage 10: Ist das Bild, das Sie von Robotern haben alles in allem positiv?

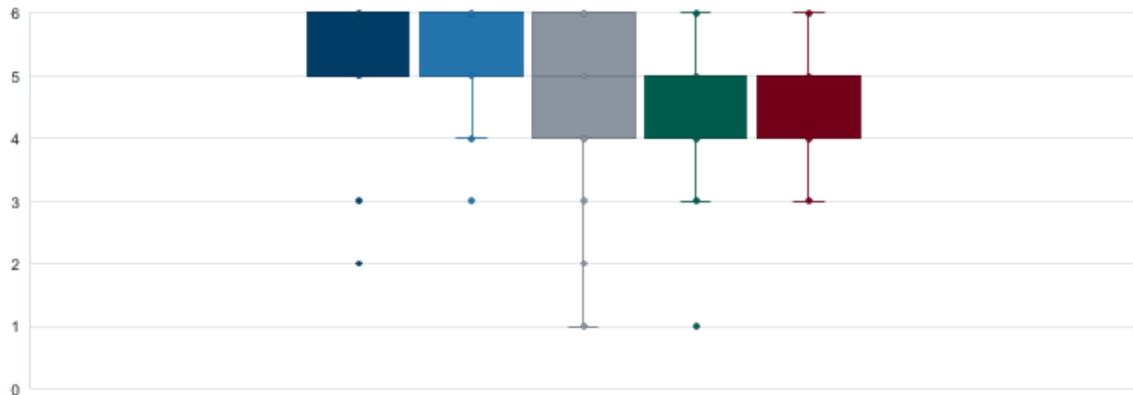


Abbildung 93: Auswertung des Fragebogens – Teil 1b

Die Auswertung des NASA TLX Fragebogens ergibt, dass die Frage nach der körperlichen Anforderung an die Versuchsdurchläufe (Frage 12: $\bar{x} = 2,15 / 20$) und nach der geistigen (Frage 11: $\bar{x} = 2,77 / 20$) eher gering eingestuft werden (Abbildung 94). Für beide Fragen liegt jeweils ein Ausreißer vor, die allerdings nicht von demselben Probanden stammen.

Die Probanden schätzen die Geschwindigkeit des Versuchsablaufs als eher niedrig ein (Frage 13: $\bar{x} = 4,23 / 20$). Der Erfolg der Aufgabe wird als eher gut eingestuft (Frage 14: $\bar{x} = 16,60 / 20$), wobei einige Ausreißer vorliegen. Das Level der Anstrengung wird wiederum sehr niedrig bewertet (Frage 15: $\bar{x} = 3,23 / 20$). Außerdem sind negative, subjektive Empfindungen nur in geringem Anteil vorhanden (Frage 16: $\bar{x} = 3,55 / 20$), jedoch weist dieses Item Ausreißer auf dem Niveau von 15 und 16 Punkten auf. Diese beiden Probanden gaben bereits bei Item 14 an, dass sie die Aufgabe nur in geringem Maße erfolgreich durchgeführt hätten.

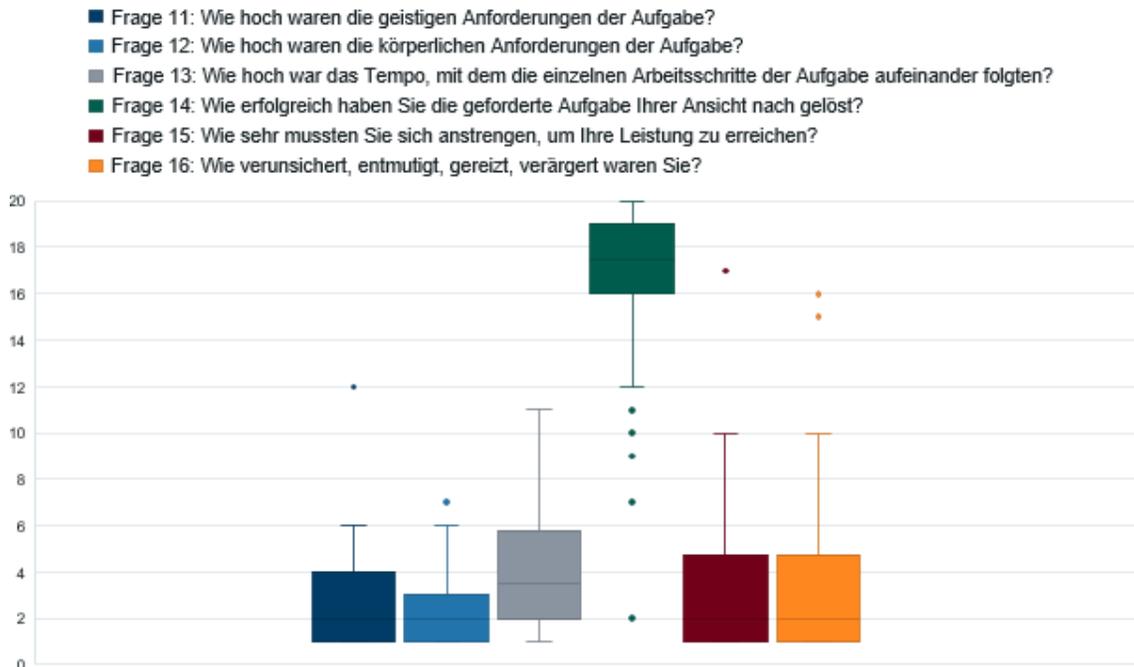


Abbildung 94: Auswertung des Fragebogens – Teil 2a (NASA TLX)

Im nächsten Abschnitt des Fragebogens werden die allgemeinen Einschätzungen der Probanden zur Robotik behandelt, siehe Abbildung 95.

Die Probanden stimmen der Aussage, dass Roboter Menschen helfen, mit einem Score von $\bar{x} = 4,95 / 6$ zu (Frage 17). Dieses Item zeigt jedoch jeweils zwei Ausreißer in den oberen sowie unteren Bereich.

Die Aussage, dass Roboter Arbeitsplätze vernichten, unterliegt einer breiten Streuung, wobei die Einordnungen bei Wert 1 beginnen und bei Wert 6 enden (Frage 18: $\bar{x} = 3,25 / 6$). Vor allem die Probanden, die bereits längere Zeit in der Produktion beschäftigt sind, fürchten den Arbeitsplatzverlust durch Roboter.

Die Probanden stimmen Frage 19, der Notwendigkeit von Robotik, deutlich zu ($\bar{x} = 5,55 / 6$). Obwohl ein Ausreißer auf dem Wert 4 vorliegt, handelt es sich bei diesem Item um dasjenige mit der höchsten durchschnittlichen Zustimmung in diesem Abschnitt.

Die nächste Frage bezieht sich auf die Dauer, welche die Probanden der Gewöhnung an den Versuchsroboter zuordnen. Diese Zeitspanne wird von den Probanden als sehr niedrig bewertet (Frage 20: $\bar{x} = 1,75 / 6$). Dieses Ergebnis stimmt inhaltlich mit den Items 11 - 13 überein, bei denen die Probanden niedrige Anforderungen angaben. Die

Auswertung zeigt, dass alle Probanden mit hoher Körpergröße eine sehr geringe Gewöhnungsphase benötigen.

Trotzdem weist der Boxplot für Item 21 aus, dass Roboter einer sorgsameren Handhabung bedürfen ($\bar{x} = 4,73 / 6$). Diese Frage bewerten die weiblichen Probanden vorsichtiger als die männlichen. Ebenso sprechen sich jüngere Probanden für einen sorgsameren Umgang als ältere aus.

Die Nützlichkeit des Versuchsroboters wird unterschiedlich wahrgenommen und zeichnet sich durch die stärkste Streuung innerhalb dieses Versuchsteils aus (Frage 22: $\bar{x} = 3,50 / 6$). Insbesondere die älteren Probanden und diejenigen mit längerer Berufserfahrung erachten den Versuchsroboter als weniger nützlich. Weiterhin halten die männlichen Probanden den Roboter in geringerem Maße für nützlich als die weiblichen.

Ebenso teilen sich die Meinungen der Probanden bei der Bewertung nach möglichen Beschäftigungsfeldern, die durch die Robotik entstehen. Trotzdem werden die Möglichkeiten der Beschäftigung durchschnittlich im guten Bereich bewertet (Frage 23: $\bar{x} = 4,08 / 6$). Dieser Wert liegt leicht unter der allgemeinen Zustimmung eines positiven Bildes auf die Robotik (siehe Item 10). Der Proband, der der Beschäftigungsgenerierung durch Robotik sehr ablehnend gegenübersteht, zeigt ebenso bei Item 17 (Roboter helfen Menschen) eine sehr geringe Zustimmung.

Die Frage nach dem Wohlbefinden, würden die Probanden bei ihrer Arbeit von einem Roboter unterstützt werden, wird durchschnittlich mit 4,45 / 6 Punkten gut bewertet. Jedoch müssen auch die Ausreißer auf dem Niveau von 3, 2 und 1 Punkt berücksichtigt werden. Diese Ausreißer stammen jedoch nicht von denselben Probanden, die sich unsicher während des Versuchs fühlten (Item 16). Ein Proband, der bei Frage 24 einen sehr niedrigen Wert auswählte, stimmte bereits der Aussage, dass Roboter Menschen helfen, nur in geringem Maße als Ausreißer zu. Weiterhin gab dieser Proband in Item 10 an, kein positives Bild von Robotern zu haben.

Ein weiterer Proband, der bei Frage 24, nach dem Wohlbefinden bei der Arbeit mit einem Roboter, einen Ausreißer darstellt, zeigte bereits in der vorherigen Frage 23, dass er der Beschäftigungsgenerierung durch Robotik nicht zustimmt.

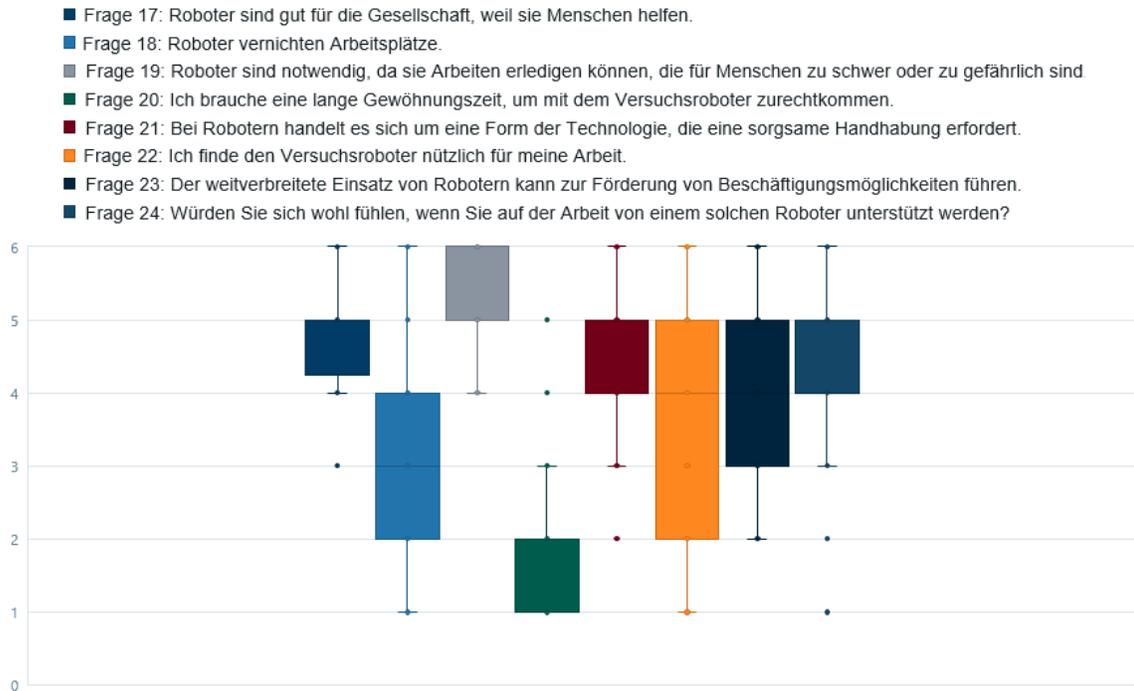


Abbildung 95: Auswertung des Fragebogens – Teil 2b

4.3.5 Diskussion und Einordnung der Ergebnisse

Die Rohdaten des Versuchs liegen grundsätzlich in gutem und gut verwertbarem Zustand vor. Jedoch wird auf die Auswertung von zwei Videodateien verzichtet, da die Blickaufzeichnung in einem Fall versetzt und im anderen Fall in sehr geringem Anteil erkannt wurde. Trotz der Durchführung der Versuche mit vierzig Probanden, beruhen die Videoauswertungen daher auf nur 38 Probanden.

Für einzelne Items des Fragebogens ergeben sich Zusammenhänge und Verknüpfungen mit den Antworten der Probanden auf andere Fragen. Eine solche Übertragung auf die Ergebnisse, welche die Videodateien hervorbringen, wäre aufschlussreich. Dies ist jedoch aufgrund von Forderungen des Datenschutzes nicht möglich. Als Folge der nicht möglichen Zuordnung zwischen Videodateien und Fragebogen, liegen der Auswertung der Fragebögen vierzig Probanden zugrunde.

Einige Aufzeichnungen sind deutlich über- oder unterbelichtet, siehe Abbildung 96. Nach Lysaght et al. (1989, S. 145) können schwankende Lichteinflüsse Fehleinschätzung des Eye-Trackings hervorrufen. Der Einfluss wird jedoch, da er innerhalb einer Aufnahme annähernd konstant bleibt, als sehr gering eingeschätzt.

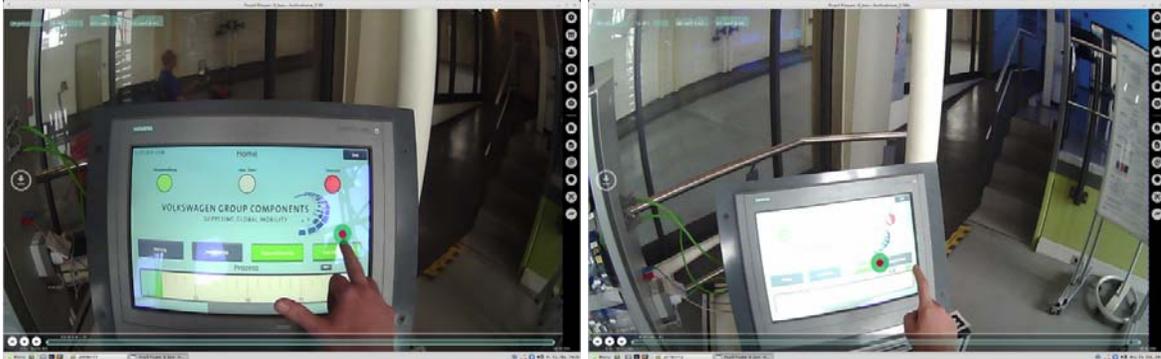


Abbildung 96: Langsame Helligkeitskorrektur des Systems

Die Versuche für diese Dissertation wurden mit einer statistisch verwertbaren Teilnehmerzahl durchgeführt, weshalb von einer Normalverteilung ausgegangen wird. Entsprechend der Hypothese H1.4 wendet sich der Proband nach der Übernahme der Dose von dem Roboter ab. In nur 9 von 38 Fällen ist die Rückwärtsbewegung des Roboters daher aufgezeichnet. Bei den übrigen Aufzeichnungen liegt die Rückwärtsbewegung außerhalb des Blickfeldes der Probanden. Aufgrund dieser niedrigen Datenmenge ($n = 9$) können für die Rückwärtsbewegung daher keine statistisch relevanten Aussagen getroffen werden.

Bestimmte Aspekte der Versuche wurden bereits im Vorfeld in weiteren Arbeiten untersucht (siehe Abschnitt 2.3). Ostermann (2014, S. 47) zeigte beispielsweise, dass Bewegungen des Roboters, die sich von dem Menschen entfernen oder quer zu ihm verlaufen, schneller sein dürfen, ohne dass eine erhöhte Beanspruchung des Menschen stattfindet. Diese Ergebnisse können durch die Untersuchungen mittels Eye-Tracking gestützt und als signifikant eingestuft werden.

Die Geschwindigkeiten des Roboters werden für diesen Versuchsaufbau, entsprechend der Sicherheitsbetrachtung und Messung auftretender Kräfte (vgl. ISO/TS 15066, 2016), gewählt und liegen bei maximal 124 mm/Sek. Dies ist etwa die Hälfte der durchschnittlichen menschlichen Geschwindigkeit (rechte Hand: 224,15 mm/Sek., linke Hand: 191,30 mm/Sek.) in einem Montageprozess (Koczula, 2018). Die Wahrnehmung der vergleichsweise langsamen Geschwindigkeit des Versuchsroboters wurde in Item 13 des Fragebogens bestätigt.

Vorliegende wissenschaftliche Untersuchungen haben die Mensch-Roboter-Kooperation bereits bei Geschwindigkeiten von 1000 mm/Sek. (Nomura et al., 2005, S. 9) oder 1400 mm/Sek. (Koppenborg et al., 2013, S. 417) betrachtet.

Die Geschwindigkeit im Versuchsaufbau liegt somit im Vergleich zur menschlichen und bereits wissenschaftlich untersuchten Geschwindigkeit auf sehr niedrigem Niveau. Nichtsdestotrotz zeigt die sehr geringe Geschwindigkeit eindeutige Auswirkung auf die Probanden.

Die Tätigkeiten des Versuchs waren für alle Probanden im Vorfeld unbekannt, weshalb die Nebenbedingungen von Routinetätigkeiten vernachlässigt werden können.

Die Untersuchung der Langzeitwirkung eines kooperierenden Roboters insbesondere im Hinblick auf neue Routinetätigkeiten und deren Auswirkungen auf das Blickverhalten stellen weiterhin ein relevantes Forschungsgebiet dar.

4.3.6 Intelligente Robotik

Während der Versuche für diese Arbeit bestand immer die Möglichkeit eines Kontaktes zwischen dem Roboter und dem Probanden. Bei der Übergabe der Dose handelt es sich beispielsweise um einen Kontakt zwischen Mensch und Roboter, der gewollt und für den Prozess erforderlich ist. Weiterhin steigt der Proband bewusst und aktiv in diesen Prozessabschnitt ein.

Bei einer engen Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter unter Serienbedingungen ist bei der MRK-Form mit Leistungs- und Kraftbegrenzung ein häufiges Auftreten ungewollter Kontakte möglich. Im Versuch wären alle Kontakte, die nicht während der Übergabe (RI) stattfinden, sogenannte ungewollte Kontakte. Finden diese Kontakte im Serienablauf statt, können sie zu einer deutlichen Belastungszunahme, Zwangshaltungen und einem Verlust der Akzeptanz des Robotersystems führen.

Die Industrie nutzt vereinzelt Arbeitsplätze, bei denen eine statische Trennung der Hauptarbeitsräume von Mensch und Roboter nicht möglich ist. Dennoch kann die Entlastung des Menschen an solchen Arbeitsplätzen sehr sinnvoll sein. Eine Unterstützung durch einen Roboter ist an diesen Arbeitsplätzen jedoch nur in höherem MRK-Level (siehe Abbildung 20 auf S. 59), beispielsweise mittels aufwändiger Abstandsüberwachung, empfehlenswert.

Ein Beispiel für diese Kategorie von Arbeitsplätzen stellt die Montagestation in Abbildung 97 dar. Bei dieser Station „ZSB Achsantriebsrad“ wird ein ca. 8 kg schwerer Ausgleich

montiert. Hierzu ist das filigrane Einsetzen von Kegelrädern, Stiften, Bolzen und einem biegbaren Kunststoffteil in den Ausgleich erforderlich.

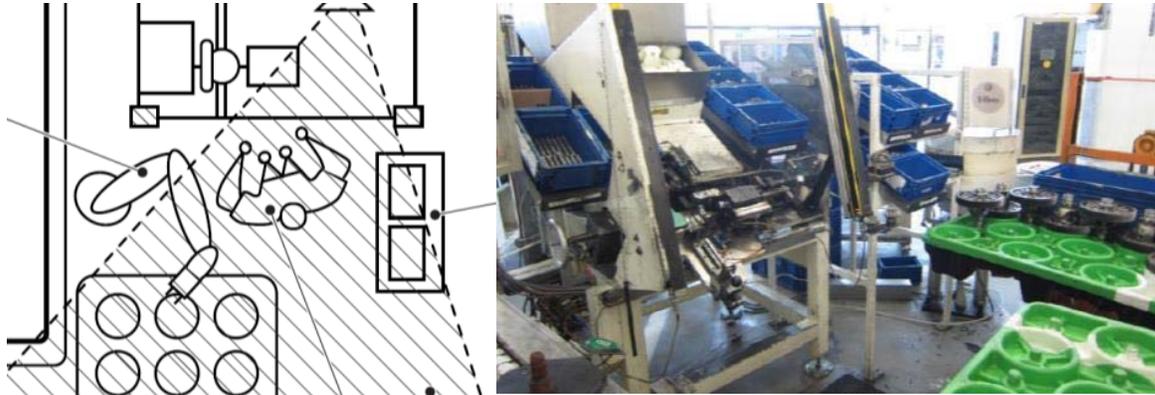


Abbildung 97: links: Arbeitsplatzkonzept für eine intelligente MRK (Naar & Fischer, 2015), rechts: Arbeitsplatz „ZSB Achsantriebsrad“ in der Montagelinie 2 des Getriebes MQ350

Die Mensch-Roboter-Kooperation wird nach aktuell gültiger Norm und unter Betrachtung der marktreifen Modelle größtenteils in der Art der Leistungs- und Kraftbegrenzung realisiert. In dieser Kooperationsform erlaubt die Normung nicht regelmäßig auftretende Kontakte.

Bei häufiger auftretenden Kontakten, wie im Beispiel aus Abbildung 97, sind zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen (ISO/TS 15066, 2016, S. 18), um regelmäßige, ungewollte Kontakte zwischen Mensch und Roboter zu unterbinden.

Ein möglicher Ansatz ist die Nutzung einer kapazitiven Sensorhaut (Cutkosky et al., 2008, S. 456), die den Roboter manipulator ummantelt. Solche Sensorik ist für bestimmte Robotermodelle bereits auf dem Markt erhältlich, in Produktionsumgebungen sind diese zurzeit jedoch noch sehr störanfällig. Weitere Konzepte, die den Roboter durch externe optische Sensorik steuern, befinden sich aktuell im Forschungsstadium (Fernandez et al., 2017, S. 203, siehe Abschnitt 2.3.3).

Komplexere Arbeitsumgebungen erfordern somit zusätzliche Absicherungen, wie die Kooperationsform der Geschwindigkeits- und Abstandsmessung, gerade wenn Kontakte sehr häufig und im Rücken des Mitarbeiters stattfinden.

Eine intelligente und synchrone Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter kann wie folgt aufgebaut sein (Naar & Fischer, 2015). Abbildung 98 zeigt einen Raum, in dem sich Mensch und Roboter direkt nebeneinander befinden. Über mindestens eine

übergeordnet aufgebaute dreidimensionale Kamera werden die Bewegungen von Mensch und Roboter erfasst. Die Daten der Kamera werden an eine Steuerung weitergeleitet, die Bewegungsdaten wie Geschwindigkeit, Bewegungsvektor und Beschleunigung verrechnet. Durch die permanente Ermittlung der Distanz zwischen Mensch und Roboter, kann bei Unterschreitung eines Mindestabstandes, siehe Abbildung 98, das Robotersystem in den sicheren Halt versetzt oder auf eine feste oder dynamische Bahn umgeleitet werden. Somit können Kontakte vermieden und die Effizienz des Roboters gesteigert werden, da dieser nach einem sicheren Halt, im Unterschied zum Sicherheitsstopp, selbständig wieder anläuft.

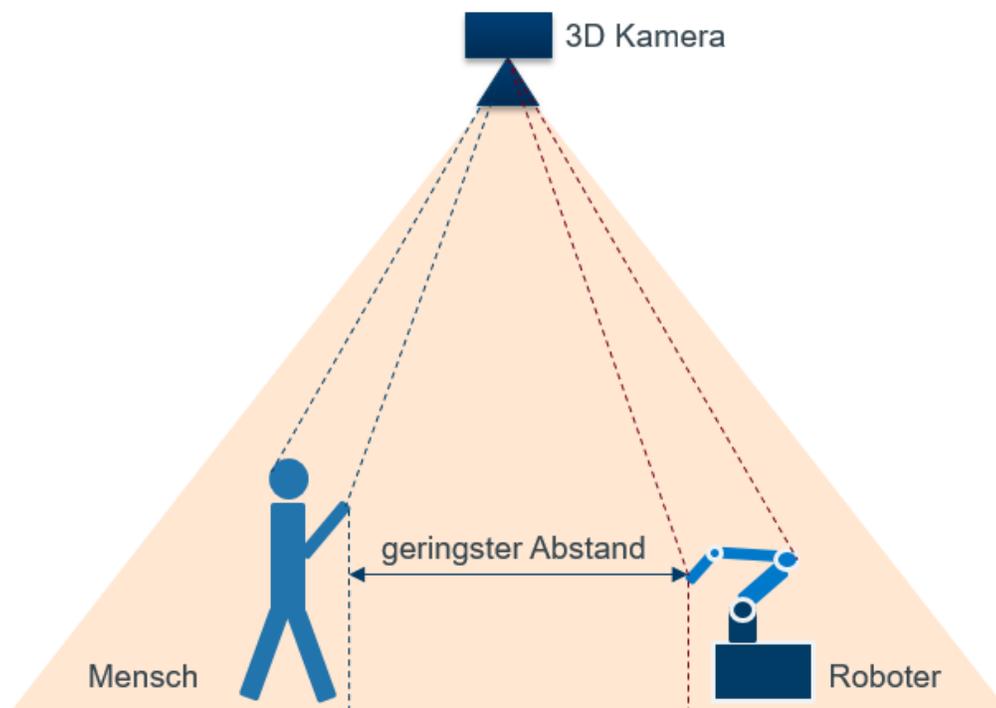


Abbildung 98: Schematische Darstellung des Konzeptes Abstandsüberwachung

Für eine intelligente, direkte MRK ist weiterhin die Optimierung der Roboterbewegung und Anpassung des Roboters an die aktuelle Tätigkeit des Mitarbeiters erforderlich. Eine Steuerung durch implizite Gesten kann dies ermöglichen.

Die einzelnen Bewegungs- und Gestenabschnitte des Mitarbeiters werden von der Kamera erfasst und verarbeitet. Das System kann dadurch einordnen, in welchem Arbeitsabschnitt sich der Mitarbeiter gerade befindet. Wenn beispielsweise nach dem Greifen in Kiste B ein Handling durch den Roboter erforderlich ist, muss dieses Handling

vom Mitarbeiter nicht explizit angefordert werden, wie zum Beispiel durch Knopfdruck. Der Roboter erhält sein Signal zum Start der unterstützenden Tätigkeit bereits durch das Greifen des Mitarbeiters in die Kiste B. Durch diese Ablaufoptimierung steht der Roboter mit einem anzuliefernden Bauteil parat, sobald der Mitarbeiter die Station freigibt. Der Roboter führt seine Tätigkeit aus, ohne Kontakt oder Wartezeiten des Mitarbeiters zu erzeugen. Diese Ablaufoptimierung führt am Beispiel der Montagestation (Abbildung 97) zu einer deutlichen Taktzeitverbesserung von etwa 19%.

Weiterführend kann dieses Konzept verwendet werden, um eine Absichtserkennung zu integrieren. Damit ist die wahrscheinliche, zukünftige Bewegung gemeint, die sich aufgrund der aktuellen Bewegungsbahn unter Gesichtspunkten der Wahrscheinlichkeit berechnen lässt.

Über ein zusätzliches Softwaretool kann neben dem Abstand zwischen Mensch und Roboter auch die zeitliche Entwicklung dieses Abstandes aufgenommen und analysiert werden (Koczula, 2018, S. 37). Aus dieser Prädiktion kann die Position im Raum ermittelt werden, an welcher der erforderliche Mindestabstand unterschritten, bzw. der Kontakt stattfinden würde. Aufgrund dieser Daten kann der Roboter vorzeitig auf eine neue Bahn gesendet, die Geschwindigkeit angepasst oder der Roboter gestoppt werden (Glatzer, 2019, S. 38).

Abbildung 99 zeigt die Erweiterung der Bewegungsrichtung des Menschen, die als Vektor im Raum integriert werden kann. Durch Prädiktionsverfahren wie den neuronalen Netzen ist eine Vorabaussage über die wahrscheinlichen, zukünftigen Positionen des Menschen in $T = +1$ möglich. Das menschliche Verhalten kann für einen kurzen Zeitabschnitt prognostiziert werden, indem ein Modell des menschlichen Verhaltens aufgrund von Gesetzmäßigkeiten des Bewegungsverhaltens und anatomischen Restriktionen, beispielsweise mögliche Bewegungswinkel der Gelenke, erstellt wird (Bortot & Bengler, 2010, S. 947).

Diese, dem Menschen zugeordneten Räume, können virtuell dynamisch für den Roboter gesperrt werden. Ebenso wird die Roboterbewegung angepasst, wenn sich der Mensch zu dem Zeitpunkt $T = 0$ in einem Bereich befindet, den der Roboter zum Zeitpunkt $T = +1$ erreichen soll.

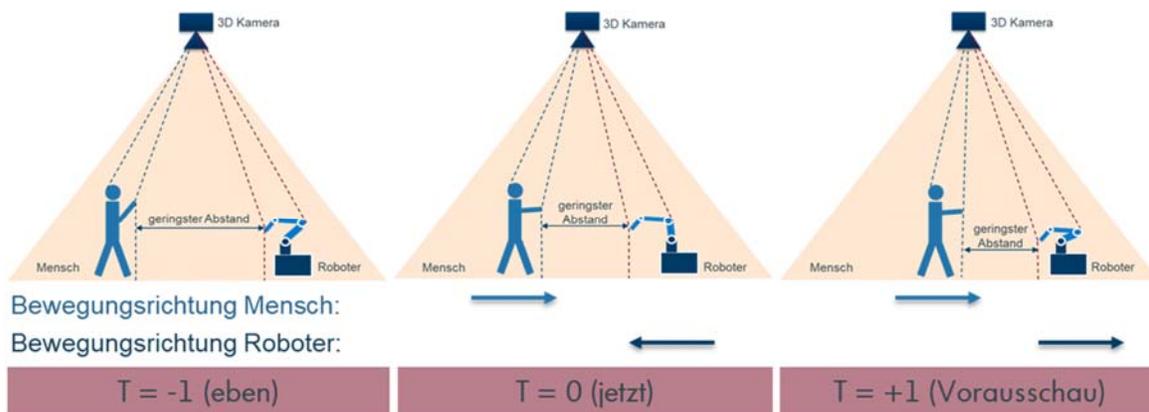


Abbildung 99: Schematische Darstellung des Konzeptes in einem Zeitintervall

Demzufolge beginnt der Roboter bereits dem Menschen auszuweichen, während dieser noch weiter entfernt ist und bevor ein physischer oder psychischer Mindestabstand erreicht wird. Die nötigen Anpassungen des Menschen an den Roboter können somit auf ein Minimum beschränkt werden und der Mitarbeiter kann deutlich freier in seinem Arbeitsraum agieren. Das frühzeitige Reagieren des Roboters ist für den Menschen deutlich wahrnehmbar und wird daher das Komfortgefühl des Menschen bei der Kooperation mit einem Roboter erhöhen.

Weiter kann die automatische Geschwindigkeitsvariation durch die intelligente und prozessoptimierte Roboterbahnplanung zusätzlich die wirtschaftliche Ausnutzung kooperierender Roboter erhöhen.

Für dieses Konzept kann es sinnvoll sein, die Kamera an dem Roboter zu montieren (Fernández, 2016, S. 14; Koch, 2002, S. 49). Durch eine entsprechende Bewegung des Roboterarmes ließe sich somit die permanente und schattenfreie Betrachtung des Mitarbeiters realisieren. Durch die Bewegung des Roboters lässt sich der Mensch mit der Kamera verfolgen und so immer in deren Fokus setzen. Die intelligente Bahnplanung auf der Basis von Kameradaten in Echtzeit zeigen bereits Lange & Hierzinger (2003, S. 8) für die Betrachtung von Bauteilen.

Zusätzlich ist eine Kommunikationsschnittstelle beispielsweise in Form einer digitalen Anzeige oder eines Smartlights möglich, durch welche der Roboter dem Menschen das sichere Tracking, den Standard-Modus oder einen Ausweich-Modus signalisieren kann.

4.3.7 Zusammenfassung des Hauptversuchs

Die praktischen und industrienahen Versuche zeigen insbesondere für die Charakteristika der Arbeitsumgebung, dem Bewegungsverhalten und der Mitarbeiterauswahl eine Gestaltungsempfehlung.

Hinsichtlich des Arbeitsraumes bietet sich die Bewegung des Roboters im direkten Blickfeld an. Insbesondere Bewegungen, die in das Blickfeld hinein und wieder herauspringen, führen zu vermehrten Fixationen beim Wiedereintritt des Roboters in das Blickfeld, die durch den Effekt des Erschreckens zu erklären sind. Pauschalisiert kann weiterhin festgehalten werden, dass eine größere Entfernung des Roboters zu geringerer Ablenkung führt.

Zusätzlich zeigt das Bewegungsverhalten deutliche und direkte Auswirkungen auf den Probanden. Schwächere Ablenkungen konnten während des Stillstands, der Querbewegung und der Interaktion aufgezeichnet werden. Dem gegenüber führen Wartezeiten und die frontale Bewegung zu vermehrter Ablenkung durch den Roboter.

Die begleitende Untersuchung mittels Fragebogen zeigt, dass insbesondere Probanden mit kürzerer Erfahrung im Produktionsbereich weniger Vorbehalte gegen Robotik im Allgemeinen aufweisen. Die jüngeren Probanden halten die Robotik und im speziellen den Versuchsroboter für nützlicher. Überdies sprachen sich die weiblichen Probanden verstärkt für einen sorgsamen Umgang mit der Robotik aus. Einen zusätzlichen entscheidenden Zusammenhang stellt die abgefragte Körpergröße der Probanden dar. Die Gruppe der großen Probanden zeigte die geringste Beanspruchung während des Versuchs, ein Gesichtspunkt der sich mit den Ergebnissen der Voruntersuchung deckt.

5 Gesamtergebnisse

Als Basis dieser Dissertation wird die Interaktion von Mensch und Roboter anhand von Charakteristiken beschrieben. Die relevantesten dieser Charakteristiken, der Abstand, der Winkel, die Geschwindigkeit und das Bewegungsmuster des Roboters liefern die Grundlage für verschiedene praktische Versuche. In diesen werden mittels Eye-Tracking Verfahren Rückschlüsse auf mögliche Aufmerksamkeitsverschiebungen der Probanden gezogen, um mögliche Beanspruchungen in der MRK zu detektieren und bereits in der Planung eines Arbeitsplatzes berücksichtigen zu können.

Im Vorfeld der Hauptuntersuchung dieser Dissertation werden fünf Voruntersuchungen durchgeführt. Diese finden mit geringer Probandenzahl statt und sind daher statistisch nicht auswertbar. Sie sollen lediglich Tendenzen aufzeigen, die entsprechend ihrer Relevanz in der Hauptuntersuchung tiefergehend betrachtet werden.

Die Voruntersuchungen zeigen, dass sowohl die Häufigkeit von Sakkaden auf den Bereich des Roboters wie auch die Dauer von Fixationen steigen, wenn der Roboter sich dem Probanden nähert. Dies kann bei stehenden und sitzenden Probanden aufgezeigt werden. Eine Reduzierung der Mensch-Roboter-Entfernung um 80 cm führt im Versuch zu einem Anstieg der Sakkaden um durchschnittlich ca. 29%.

Ebenso erhöht eine Roboterbewegung im peripheren Sehbereich die Anzahl der Fixationen und Sakkaden. Dies gilt für die horizontale und die vertikale Peripherie. Die Veränderung des horizontalen Winkels von 0° auf 60° führt im Versuch zu einer durchschnittlichen Erhöhung der Anzahl der Sakkaden um ca. 63%.

Hiervon können nur Bewegungen des Roboters ausgenommen werden, die sich im Kniebereich, sehr nah zu den Probanden bewegen. An dieser Stelle liegen die Bewegungen außerhalb des Blickfeldes der Probanden und lösen daher nur sehr geringe bis gar keine Ablenkungsreaktionen aus.

Die blaue Farbe des Robotergrifiers weist eine besondere Wirkung auf die Probanden auf. Entgegen der Erwartung zeigen weder der Gegenteil mittels eines signalrot ummantelten Greifers, noch die orangefarbenen Kappen des Roboter manipulators ähnliche Präsenz. Dieses Blickverhalten löst sich erst in der Hauptuntersuchung auf.

Mit der Erhöhung der Fixationen auf den Roboter geht eine allgemeine Unruhe in der Blickführung einher, die auch zu einem Anstieg der Sakkaden in die Umgebung führt.

Die Ablenkungswirkung eines autonomen Roboters ähnelt der eines Knickarmroboters, obwohl die Komplexität durch zusätzliche Bewegungsmuster im Raum erhöht wird. Bei verschiedenen Versuchen innerhalb des ersten Tages eines neuen Robotereinsatz kann keine Veränderung der Ablenkungswirkung nachgewiesen werden. Eine Langzeituntersuchung zur Ablenkungswirkung des autonomen Robotersystems kann aus verschiedenen Gründen nicht durchgeführt werden. Bei einer entsprechenden Versuchsreihe ist mit weitergehenden Erkenntnissen zu Produktivität, Gewöhnung und Ablenkung zu rechnen.

Tritt der autonome Roboter in das Blickfeld des Probanden ein, wird er fixiert. Dieser Ablauf erfolgt nach einem Muster: Eintritt – Fixation – Abwendung – Austritt.

Für den Fall der Bewegung im Raum wird gezeigt, dass beim Zurückkehren zum letzten Begegnungspunkt mit dem Roboter diese Position als Suchpunkt fixiert wird.

Die Hauptuntersuchung wurde in statistisch relevanter Größe in einem reproduzierbaren Versuchsaufbau durchgeführt und von einem Fragebogen begleitet.

Die Bewegung des Roboters wird in sieben verschiedene Bewegungsmuster unterteilt, die einzeln untersucht werden. Die Versuche zeigen, dass ein bewegtes Objekt Fixationen hervorruft. Während der Roboter zu Versuchsbeginn stillsteht, liegen die Fixationen auf der MM-Anlage und dem dort stattfindenden Prozess. Die Fixationen auf den Roboter starten erst, wenn dieser in Bewegung versetzt wird. Die Intensität der Fixationsdichte auf den Prozess in der MM-Anlage korreliert mit der des Roboters quer zum Probanden.

Die Querbewegung wird aus diesem Grund als Referenz für die Differenzwertmethode verwendet, welche die Verteilungsstärke der Gesamtfixationsdauer auf den AOs in den Bewegungsmustern vergleicht. Der t-Test zeigt, dass die Frontalbewegung, die beiden Wartezeiten vor und nach der Interaktion sowie die Rückwärtsbewegung signifikante Abweichungen zur Querbewegung aufweisen. Nur bei stehendem Roboter und während der Interaktion liegt keine Signifikanz vor. Die Abweichungen während der Frontalbewegung und der Wartezeit werden als Belastung eingestuft, die Einleitung der Rückwärtsbewegung und diese selbst als neutrale Veränderung in der Blickverteilung.

Die vermehrten Fixationen auf den blauen Greifer, welche während der Vorversuche vorlagen, wiederholen sich in der Hauptuntersuchung nicht. Entsprechend der früheren Vermutung werden neben dem Greifer auch die orangefarbenen Kappen des Roboters fixiert. Dies ist größtenteils davon abhängig, ob Roboterarm oder Greifer sich in kürzerer Entfernung zum Probanden befinden.

Insbesondere bei stehendem und rückwärtsgerichtetem Roboter liegt eine höhere Fixationsdauer auf den Roboter als auf den Greifer vor. Der zurückweichende Roboter ist für die meisten Probanden wenig interessant und sie wenden sich vor oder während der rückwärtigen Bewegung von dem Roboter ab.

Der Durchmesser der Pupillen zeigt Tendenzen der Miosis und Mydriasis auf. Der Durchmesser der Pupille ist geringer, wenn der Roboter sich nicht im Blickfeld befindet und am größten während der Interaktion mit dem Roboter sowie im Bewegungsabschnitt direkt vor der Interaktion. Die Veränderungen des Pupillendurchmessers sind jedoch statistisch nicht signifikant.

Im Hintergrund des Versuchsaufbaus ist der Straßenverkehr innerhalb einer Fertigungshalle für die Probanden einsehbar. Während Bewegungen im Hintergrund des Versuchs ablaufen, liegen signifikante Verschiebungen der Aufmerksamkeit in die Hintergrundbewegungen vor. Die Probanden lassen sich während der Betrachtung der MM-Anlage stärker von den Hintergrundbewegungen ablenken als während der Fixationen auf den Roboter oder den Greifer. Die Fixierung von Roboter und Greifer wird daher als intensiver eingestuft als die auf die MM-Anlage.

Die Auswertung des Fragebogens weist die vierzig Probanden des Versuchs als technologisch sehr interessiert aus. Dem positiven Bild eines Roboters stimmen sie zu 80% zu, ein Wert, der 8% unterhalb des europäischen Durchschnitts liegt.

Die Probanden bestätigen durch den verwendeten NASA TLX Fragebogen eine sehr geringe körperliche und geistige Beanspruchung während des Versuchs. Dies untermauert nochmals die Deutlichkeit der dargestellten Ergebnisse.

Eine breite Streuung zeigt die Auswertung hinsichtlich der Nützlichkeit des Roboterdemonstrators und dem gesellschaftspolitischen Thema der Arbeitsplatzsicherheit bei zunehmender Roboterdichte.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen stellen eine Grundlagenuntersuchung im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktion dar und liefern wichtige Erkenntnisse für den Aufbau einer solchen Interaktionsform.

Das Vorgehen in dieser Arbeit dient der Beantwortung von vier zentralen Forschungsfragen.

1) Wodurch wird die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter beschrieben?

Die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter wird in ihre Einzelteilnehmer Mensch und Roboter sowie diejenigen Charakteristiken unterteilt, welche die Beziehung von Mensch und Roboter zueinander beschreiben.

Ein Roboter lässt sich beispielsweise durch seine Größe, Form, Traglast und Technik in den Achsen beschreiben. Das für die Untersuchungen genutzte Robotermodell wurde insbesondere aufgrund seiner hohen Sensitivität und daher sehr guten Eignung für die direkte Interaktion mit den Probanden ausgewählt.

Der Mensch wird hinsichtlich seiner Wahrnehmungskanäle beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf die visuelle Wahrnehmung gelegt wird, welche die Basis für die Versuche mittels Eye-Tracking System darstellt. Insbesondere wird dabei der Zusammenhang zwischen den messbaren Blickbewegungsdaten, der visuellen Wahrnehmung und der daraus folgenden Aufmerksamkeit aufgezeigt. Die Auflistung der objektiven Personendaten, wie dem Geschlecht und der Körpergröße, bilden die Grundlage für den begleitenden Fragebogen der Versuchsreihen.

Im Weiteren wird die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter analysiert und das resultierende Arbeitsumfeld beschrieben. Als die wichtigsten Einflussfaktoren für die Planung einer MRK werden die Entfernung, der Winkel, die Geschwindigkeit und das Bewegungsmuster festgelegt.

- 2) Wie sollte ein Arbeitsplatz gestaltet sein, der durch möglichen, „ungewollten“ Kontakt zwischen Mensch und Roboter gekennzeichnet ist?

Bei jeder Bewegung des Roboters ist die resultierende Wirkung auf den interagierenden Menschen zu berücksichtigen. Insbesondere ungewollte Kontakte stellen eine Beanspruchung dar und sollen vermieden werden.

Auf Basis der Versuchsergebnisse (siehe Kapitel 4.3.4) sollte der Roboter sich im direkten Sichtfeld des Menschen befinden. Die Geschwindigkeiten, die aus den Vorgaben der aktuellen Normung resultieren, wurden von den Probanden als sehr langsam und angenehm wahrgenommen. Hinsichtlich des Bewegungsmusters zeigen die Versuche, dass Bewegungen, die sich von dem Probanden entfernen oder quer zu ihm verlaufen, weniger ablenkend wirken. Bezüglich des Abstands zwischen Mensch und Roboter ist sowohl die horizontale als auch die vertikale Entfernung zu berücksichtigen. Die Roboterbewegung sollte maximal im privaten Distanzbereich des Menschen stattfinden.

- 3) Wie ändert sich diese Auslegungsempfehlung unter dem Aspekt der intelligenten Robotik?

Aus der Versuchsauswertung (siehe Kapitel 4.3.4) und dem Exkurs hinsichtlich der intelligenten Robotik (siehe Kapitel 4.3.6) geht hervor, dass die menschenorientierte Bewegung das Ziel einer intelligenten MRK sein soll. Die dargestellte Idee zur Verknüpfung von prädiktierten Bewegungsdaten des Menschen mit der Bewegungsbahn des Roboters liefert hierfür viele Möglichkeiten. Auf Basis aktueller Forschungsergebnisse scheint es sinnvoll, die Bewegungsbahn des Roboters auf Basis von Prädiktionsdaten derart anzupassen, dass sich der Roboter in den Bewegungsmustern bewegt, die bei dem Menschen eine geringe Beanspruchung erzeugen.

Dies könnte beispielsweise so erfolgen, dass der Roboter seine Bewegung entsprechend der Position des Menschen anpasst, wodurch ungünstige Bewegungen, wie die Fahrt frontal auf den Menschen zu, vermieden werden. Der Roboter könnte solche Bewegungen immer dann ausführen, wenn der Mensch sich gerade weiter entfernt befindet. Eine entsprechende menschenorientierte, angepasste Bewegung ließe sich unter anderem auf die Höhe der Bewegungsbahn und die Geschwindigkeit übertragen.

Bei einer solchen optimierten Roboterbewegung bleibt jedoch zu prüfen, ob sich die Vorteile der menschorientierten Bewegung stärker auswirken als die potentiell belastende Ablenkung (Thiemermann, 2005, S. 35; Stach, 2015, S. 17; Arai et al., 2010), die durch die Unvorhersehbarkeit und geminderte Systemkontrolle der intelligenten Roboterbewegung entstehen kann (Hülke, 2015, S. 12).

4) Wie können diese Aspekte bereits in der Planung und Bewertung von möglichen Arbeitsplätzen mit Mensch-Roboter-Kooperation berücksichtigt werden?

Bei der Planung eines Arbeitsplatzes der Mensch-Roboter-Kooperation ist grundlegend zu unterscheiden, ob es sich um eine komplett freie Planung oder eine nachträgliche Integration des Roboters in einen vorhandenen Arbeitsplatz handelt. Bei feststehenden Randbedingungen kann die Bandbreite der Charakteristiken womöglich nicht vollständig ausgeschöpft werden. Beispielsweise kann der bestehende Arbeitsplatz eine bestimmte Reichweite oder Traglast des Roboters bedingen, welche die Auswahl einschränken.

Insbesondere hinsichtlich des Layouts stehen bei einer freien Planung viele Optionen zur Verfügung. Diese Rahmenbedingungen sollten entsprechend der beschriebenen Charakteristiken menschorientiert ausgelegt werden.

Ein Beispiel hierfür kann eine Montagestation sein, bei der der Roboter derart zwischen den Behältern, aus denen er die zu montierenden Bauteile entnimmt, platziert wird, dass er sich möglichst häufig quer zu dem interagierenden Menschen bewegt.

6.2 Ausblick

Insbesondere seit dem Jahr 2013 werden vermehrt Automatisierungslösungen mit kooperierenden Robotern in der Industrie umgesetzt (Bauer et al., 2016). Bisher sind dies Einzellösungen, da die Anwendungen von Integratoren und Prüfstellen nur für einen konkreten Einzelfall ausgelegt und abgenommen werden (Schmitz, 2019, S. 21). In dieser Hinsicht wird zukünftig ein Umdenken erforderlich sein (Höhl, 2018).

Der eigentliche Roboter manipulator wird nach der gültigen Maschinenrichtlinie als unfertige Maschine betrachtet (Maschinenrichtlinie, 2006, S. 28). Einige Hersteller lassen die prinzipielle Eignung ihrer Roboter für den kooperierenden Betrieb daher durch eine Baumusterprüfung bestätigen (Maschinenrichtlinie, 2006, S. 31).

Für Unternehmen stellt insbesondere die wirtschaftliche Bewertung einer MRK Applikation Herausforderungen dar. Die Beweggründe für den Einsatz eines MRK-Roboters sind größtenteils ergonomischen Fragestellungen geschuldet. Die weitgreifenden Verbesserungen der Arbeitsplatzqualität und der Gesundheit von Mitarbeitern lassen sich jedoch nur in geringem Maße quantitativ bewerten (Bauer et al., 2016, S. 22).

Für den schnelleren und wirtschaftlicheren Einsatz der Mensch-Roboter-Interaktion ist eine allgemeingültige und grundsätzliche Integrationslösung erforderlich (Glück, 2018). In diesem Sinne sollte die Flexibilität der Systeme gesteigert und allgemeinere CE-Erklärungen, die nachträgliche Änderungen am System zulassen, möglich werden (vgl. Ostermann, 2014, S. 12; Franka, 2018).

Zukünftige Roboterlösungen sollten daher ohne detaillierte und starre Programmierung auskommen und sich durch eine virtuelle, aufgabenorientierte Programmierung auszeichnen (Siegert & Bocionek, 1996, S. 97). Erste Firmen zeigen bereits Programmierverfahren per App und eine Bedienung per Tablet-PC, welche die Bedienerfreundlichkeit durch smarte und intuitive Lösungen erhöhen sollen (Zerbel, 2017, S. 5). Freiheitsgrade in der Programmstruktur des Roboters bedingen jedoch intelligente und berührungslose Systeme. Der Roboter sollte befähigt sein, entsprechend der jeweiligen Situation sensitiv und vorausschauend auf seine Umgebung zu reagieren (Höhl, 2018). Hierfür wird zukünftig die schattenfreie, dreidimensionale und dynamische Raumüberwachung in sicherer Technik erforderlich (Henrich et al., 2008, S. 9).

Die Technologie kann gleichzeitig möglichen Missbrauch sowie Fehlanwendung vorbeugen und sicherheitskonform auf ein solches Vorgehen reagieren. Ebenso kann eine intelligente systeminterne Prüfung mögliche Fehleingaben während des Einrichtbetriebs, beispielsweise eine falsche Massenangabe des Werkzeugs, erkennen (vgl. Krieger, 2009, S. 7).

Weiterhin ist Entwicklungsbedarf im Bereich der Leistungsfähigkeit von Steuerungen und Kommunikationsprotokollen erforderlich (Zimmermann, 2019, S. 58), insbesondere hinsichtlich einer dreidimensionalen Echtzeitüberwachung. Die anwachsende Datenmenge erfordert zukünftig eine starke digitale Infrastruktur (Sauer & Jasperneite, 2011, S. 1; Wagner, 2018, S. 5).

Die intelligente Roboterbewegung sollte die Berücksichtigung individueller körperlicher und kognitiver Eigenschaften des Menschen beinhalten sowie deutliche Verbesserungen hinsichtlich der Mensch-Roboter-Kommunikation vorweisen (Itasse, 2019, S. 28; Höhl, 2018). Das Robotersystem soll sich an seine jeweilige Umgebung anpassen (Braune, 2015, S. 18).

Eine Verbesserung der Sensitivität der Manipulatoren ist durch Forschungen im Bereich der Antriebssysteme möglich (Michel, 2019, S. 24). Diese werden inhärenter und nachgiebiger ausgelegt. Durch seriell elastische Aktoren, sogenannte dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) entwickelt beispielsweise die Universität Erlangen neuartige Antriebe (Reitelshöfer et al., 2017).

Besondere Berücksichtigung sollen die Werkzeuge des MRK-Roboters erhalten. Heute stellen die Werkzeuge am Endeffektor einen großen Risikofaktor in der Sicherheitsbetrachtung dar, beispielsweise sich schließende Greiferbacken, siehe Anhang 6. Wie in Abschnitt 2.3.1 gezeigt, weist der Markt bereits Greifsysteme mit Bildschirm auf, der als Kommunikationsschnittstelle verwendet werden kann. Weitere Entwicklungen sollen mögliche gefährliche Werkzeuge am Endeffektor sowie die Oberfläche des Roboters mittels Radar absichern (BMBF, 2019; Müller et al., 2019, S. 97). Im Bereich der Greiftechnik sind umfassende Produktänderungen hinsichtlich flexibler Greiferbacken (Gordon, 2019) für das Handling verschiedener Bauteile sowie immanente Nachgiebigkeit zu erwarten (Müller et al., 2019, S. 67). Ebenso wird die Greiftechnik zukünftig mit intelligenter Sensorik ausgestattet sein (Wagner, 2018, S. 4). Eine solche Sensorik soll eine engere Zusammenarbeit von Roboter und Mensch ermöglichen (Müller et al., 2019, S. 99).

Die Auswirkungen, die eine solche skizzierte Zukunft der Robotik auf den Menschen hat, muss zwingend weitergehend geprüft werden, um eine mögliche zusätzliche Beanspruchung des Menschen auszuschließen (Schmitz & Reckter, 2019, S. 1; siehe Abschnitt 6.1). Bereits im heutigen Stadium der MRK sollten Langzeitstudien zur Wirkung des Roboters durchgeführt werden, um die Ergebnisse dieser Dissertation und weitere Charakteristiken über einen längeren Zeitraum und unter Berücksichtigung des Gewöhnungseffektes bewerten zu können.

Die Mensch-Roboter-Kooperation muss sicher, intelligent und wirtschaftlich sein.

Literaturverzeichnis

- Akkerboom, H. (2012). *Wirtschaftsstatistik im Bachelor: Grundlagen und Datenanalyse*. (3. Aufl.). Wiesbaden: Springer Verlag.
- Albu-Schäffer, A., Bicchi, A., Chatila, R. & de Luca, A. (2005). *Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains: Safety and Dependability*. Zugriff am 20.03.2019 unter https://www.researchgate.net/publication/224782880_Physical_Human-Robot_Interaction_in_Anthropic_Domains_Safety_and_Dependability
- Arai, H. (2003). *Method and system for controlling cooperative object-transporting robot*. US-Patentnr.: 6522952 B1.
- Arai, T., Kato, R. & Fujita, M. (2010). Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 5-8.
- Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. & Furkmanns, K. (2008). *Handbuch Logistik* (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Aubert, H. (1874). Physiologische Optik. In F. Ritter von Arlt, A. Gräfe & T. Saemisch (Hrsg.) *Handbuch der gesamten Augenheilkunde: Anatomie und Physiologie* (393-691). Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann.
- Bauer, W. (Hrsg.), Bender, M., Braun, M., Rally, P. & Scholtz, O. (2016). *Leichtbauroboter in der manuellen Montage - einfach einfach anfangen*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Becker-Carus, C. (2011). *Allgemeine Psychologie - Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Beer, J. M., Prakash, A., Mitzner, T. L. & Rogers, W. A. (2012). *Understanding Robot Acceptance*, Atlanta: Georgia Institute of Technology.
- Behnke, S. (2013). Kooperierende mobile Roboter. *at-Automatisierungstechnik*, 61, 233-244.
- Behrens, R. & Elkmann, N. (2014). Study on meaningful and verified Thresholds for minimizing the Consequences of Human-Robot Collisions. *International Conference on Robotics & Automation* (S. 3378-3383). Hong Kong: IEEE
- Behrens, R. & Elkmann, N. (2016). *Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration - Aktuelle Entwicklungen und Projekte*. Hannover: Robotics Congress 2016.

- Bendel, O. (2017). Co-Robots und Co. – Entwicklungen und Trends bei Industrierobotern. *netzwoche*, 09, 30-31.
- Berghaus, N. (2005). *Eye-Tracking im stationären Einzelhandel: eine empirische Analyse der Wahrnehmung*. Köln: Josef Eul Verlag GmbH.
- Berthel, H. (2012). Der intelligente Produktlebenszyklus. In H. Kemper, B. Pedell & H. Schäfer (Hrsg.) *Management vernetzter Produktionssysteme: Innovation, Nachhaltigkeit und Risikomanagement* (101-114). München: Franz Vahlen GmbH.
- Betriebssicherheitsverordnung (2015). § 3 Gefährdungsbeurteilung. Zugriff am 04.02.2016 unter https://www.gesetze-im-internet.de/betrstichv_2015/___3.html
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. F. (2003). *Biologische Psychologie*. Berlin: Springer.
- Blume, J. (2014). *Methoden und Anwendungen zur intuitiven Mensch-Roboter-Interaktion*, München: Technischen Universität München.
- Bonev, I. (2015). *Who Is Gomtec, the Collaborative Robotics Company Acquired by ABB? - IEEE Spectrum*. Zugriff am 08.03.2019 unter <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/who-is-gomtec-the-collaborative-robotics-company-acquired-by-abb>
- Bortot, D. & Bengler, K. (2010). Bewegungsprädiktion zur Steigerung der Effizienz von Mensch-Roboter-Kooperationen - 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.), *Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten* (945-948). Dortmund: GfA-Press.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Bortz, J. (2005). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (6. Aufl.). Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Braune, I. (9.12.2015). *Mensch-Roboter-Kollaboration im Spannungsfeld von Flexibilität, Produktivität, Safety, Ergonomie und Psychologie*. München: VDI Wissensforum.
- Bruggencate, G. T. & Dieringer, N. (2005). Sensomotorische Systeme: Körperhaltung, Bewegung und Blickmotorik. In Silbernagel et al. (Hrsg.), *Physiologie* (S. 735-784). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

- Brzeski, C. & Burk, I. (2015). *Economic Research: Die Roboter kommen - Folgen der Automatisierung für den deutschen Arbeitsmarkt*. Zugriff am 04.02.2016 unter <https://www.ing-diba.de/pdf/ueber-uns/presse/publikationen/ing-diba-economic-research-die-roboter-kommen.pdf>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2015). *Bekanntmachung "Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen"*. Zugriff am 12.05.2015 unter <http://www.bmbf.de/foerderungen/26763.php>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2019). *RoKoRa*. Zugriff am 08. 03. 2019 unter <https://www.technik-zum-menschen-bringen.de/projekte/rokora>
- Bundesrat (2010). *Empfehlungen der Ausschüsse 41/1/10. Jahresgutsachten 2009/10 des Sachverständigenrates zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung*. Zugriff am 20.04.2015 unter http://www.umwelt-online.de/PDFBR/2010/0041_2D1_2D10.pdf
- Bundesverband der Deutschen Industrie (2011). *Deutschland 2030 – Zukunftsperspektiven der Wertschöpfung*, Berlin: BDI-Drucksache.
- Buswell, G. T. (1920). *An experimental study of the eye-voice span in reading*. Chicago: University of Chicago.
- Butov, A., Herrmann, F., Merkert, M. & Nägele, F. (2014). Modulares Fertigungskonzept für E-Motoren. *ATZ extra*, 09, 85-89.
- Capek, K., 1920. *R. U. R. (Rossum's Universal Robots)*. Zugriff am 09 03 2018 unter <http://preprints.readingroo.ms/RUR/rur.pdf>
- Cencen, A., Verlinden, J. & Geraedts, J. (2015). Characterizing the State of the Art of Human-Robot Coproduction. In *International Conference on Social Robotics* (135-144). Delft: Springer.
- Ciupek, M. (2018). Paradigmenwechsel in der Robotik. *VDI Nachrichten*, 35, 18.
- Cobotsguide (2017). *Meet the Cobots - CobotsGuide*. Zugriff am 23.06.2017 unter <http://cobotsguide.com/cobots/#charts>
- Cox, E. P. (1980). The Optimal Number of response Alternatives for a scale: A Review. *Journal of Marketing Research*, 407-422.

Cutkosky, M. R., Howe, R. D. & Provancher, W. R. (2008). Sensing and Perception. In B. Siciliano & O. Khatib (Hrsg.), *Handbook of Robotics* (451-471). Berlin, Heidelberg: Springer.

De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A. & Bicchi, A. (2007). An atlas of physical human–robot interaction. *Mechanism and Maschine Theory* (253-270). Zugriff am 20.04.2015 unter <http://www.centropiaggio.unipi.it/sites/default/files/softarm-MMT.pdf>

Dengler, K. & Matthes, B. (2015). *Folgen der Digitalisierung für die Arbeitswelt - Substituierbarkeitspotenziale von Berufen in Deutschland*. IAB Forschungsbericht 11/2015. Nürnberg: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung.

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Frankfurt: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

Deutsche Forschungsgemeinschaft (2017). *Die Physical Exploration Challenge: Roboter, die lernen, Freiheitsgrade der Welt zu entdecken, zu bewegen und zu explorieren*. Zugriff am 19.07.2017 unter <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/260200664>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2011). *Manipulation von Schutzeinrichtungen an Maschinen*. Zugriff am 23.03.2018 unter <https://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/reportgesamt-manipulation.pdf>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2016). *DGUV-Information: Sicherheitsbezogene Betriebsarten an spanenden Werkzeugmaschinen der Metallbearbeitung*. Mainz: DGUV.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2017). *Kollaborierende Robotersysteme - Planung von Anlagen mit der Funktion „Leistungs- und Kraftbegrenzung“*. DGUV-Information: FB HM-080. Mainz: Fachbereich Holz und Metall der DGUV.

Deutscher Bundestag (2002). *Demografischer Wandel. Zweiter Zwischenbericht der Enquete-Kommission „Demografischer Wandel“*. Zugriff am 20.04.2015 unter <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/14/088/1408800.pdf>

Deutscher Bundestag (2016). *Zur Diskussion um die Verkürzung von Produktlebenszyklen*. Zugriff am 19.01.2019 unter <https://www.bundestag.de/blob/438002/42b9bf2ae2369fd4b8dd119d968a1380/wd-5-053-16-pdf-data.pdf>

- Deutsches Institut für Normung (2000). *EN ISO 10075-2. Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 2: Gestaltungsgrundsätze*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung (2006). *DIN EN ISO 9241-110. Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung (2012). *DIN EN ISO 10218 Teil 1 und 2. Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung (2017). *ISO / TS 15066. Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter*. Vernier, Geneva, Switzerland: DIN-Normenausschuss Maschinenbau.
- Devol Jr., G. C. (1961). *Programmed Article Transfer*. Patentnr. 2,988,237. United States: United States Patent Office.
- Dietz, T. (2012). *Mensch-Roboter-Kollaboration: Normative Rahmenbedingungen und aktuelle Entwicklungen in der Mensch-Roboter-Kollaboration*. Zugriff am 06.03.2014 unter <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-1737784.pdf>
- Doll, N. (01.02.2015). Aufmarsch der Roboter. *Welt am Sonntag*. 29-31.
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Dörr, B. (2015). *Einfluss psychischer Arbeitsbelastungsfaktoren auf die Produkt- und Prozessqualität innerhalb der Getriebefertigung*. Kassel: kassel university press GmbH.
- Dörr, S. & Lopez, F. G. (3/2015). Vernetzte intelligente Navigation für fahrerlose Transportsysteme. *open automation - Das Fachmagazin für das Management*. 10-13.
- Duden (1996). *Die deutsche Rechtschreibung* (21. Aufl.). Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: Dudenverlag.
- Duden, 2017a. *Duden: Roboter*. Zugriff am 30.01.2017 unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/Roboter>
- Duden, 2017b. *Duden: Kognition*. Zugriff am 03.02.2017 unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/Kognition>
- Duden, 2019a. *Duden: Verantwortungsbewusstsein*. Zugriff am 05.01.2019 unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Verantwortungsbewusstsein>

- Duden, 2019b. *Duden: Erfahrung*. Zugriff am 05.01.2019 unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Erfahrung>
- Duden, 2019c. *Duden: Charakteristik*. Zugriff am 05.04.2019 unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Charakteristik>
- Düpjohn, W., Ostermann, B. & Stengel, D. (01.2013). Sicher und effizient – Was hinter dem Forschungsprojekt EsLMiP steckt. *Computer & Automation*, 33.
- Ergoneers (2011). *Dikablis - The Eye Tracking System: User Manual*. Zugriff am 12.03.2019 unter http://real.psych.ubc.ca/images/9/9b/SW_Dikablis_Handbuch_V2.0_ENG.pdf
- Ergoneers (2019). *Neues mobiles Eye Tracking System - Dikablis Glasses 3*. Zugriff am 11.01.2019 unter <https://www.ergoneers.com/mobiler-eye-tracker-dikablis-glasses-3/>
- Europäische Kommission (2012). *Einstellung der Öffentlichkeit zu Robotern*. Spezial Eurobarometer 382. Zugriff am 11.09.2015 unter http://ec.europa.eu/public_opinion/index_en.htm
- Eysel, U. (2005). Sehsystem. In S. Silbernagl (Hrsg.), *Physiologie* (S. 685-712, 5. Aufl.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Fanuc, 2015. *Kollaborierender CR35ia*. Zugriff am 11.07.2015 unter <http://www.fanuc.eu/de/de/roboter/roboterfilter-seite/kollaborierender-cr35ia>
- Fernández, J., Mronga, D., Günther, M., Knobloch, T., Wirkus, M., Schröer, M., Trampler, M., Stiene, S., Kirchner, E., Bargsten, V., Bänzinger, T., Teiwes, J., Krüger, T. & Kirchner, F. (12.08.2016). *Intuitive and Safe Dual-Arm Robotic System for Human-Robot Collaboration in Industrial Settings*.
- Fernández, J., Mronga, D., Günther, M., Wirkus, M., Schröer, M., Stiene, S., Kirchner, E., Bargsten, V., Bänzinger, T., Teiwes, J., Krüger, T. & Kirchner, F. (2017). iMRK: Demonstrator for Intelligent and Intuitive Human--Robot Collaboration in Industrial Manufacturing. *KI - Künstliche Intelligenz, German Journal on Artificial Intelligence - Organ des Fachbereiches "Künstliche Intelligenz"*, 203-207. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/s13218-016-0481-5>
- Fischer, N. (2014). *Auslegungsempfehlung der Praxis-Einführung kollaborierender Roboter bei Volkswagen Kassel hinsichtlich technischer Machbarkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Kassel, Kassel.

- Flacco, F., Kröger, T., De Luca, A. & Khatib, O. (2012). A Depth Space Approach to Human-Robot Collision Avoidance. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (14.-18.05.2012)*, 338-345.
- Franka Emika GmbH (2018). *CE-Checkliste (Panda - out of the box solution)*, München: Franka Emika GmbH.
- Freitag, M., Molzow-Voit, F., Quandt, M. & Spöttl, G. (2016). Aktuelle Entwicklungen der Robotik und ihre Implikationen für den Menschen. In F. Molzow-Voit, M. Quandt, M. Freitag & G. Spöttl (Hrsg.), *Robotik in der Logistik: Qualifizierung für Fachkräfte und Entscheider* (S. 9-22). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Frey, C.-B. & Osborne, M. A. (2013). *The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation?*. Zugriff am 31. 03. 2016 unter http://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf
- Frey, D. (1978). Die Theorie der kognitiven Dissonanz. In D. Frey (Hrsg.), *Kognitive Theorien der Sozialpsychologie* (S. 243-292). Bern: Verlag Hans Huber Bern.
- Frost, I. (2017). *Statistische Testverfahren, Signifikanz und p-Werte*. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Frutig, M. (2013). (Leichtbau-)Roboter sind im kommen. *technica*, 06/07, 44-49.
- Gartner (2018). *5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies*. Zugriff am 12.10.2018 unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>
- Gedinat, J. (2016). *Momente der Globalisierung: Eine Ergründung*. Freiburg, München: Verlag Karl Alber Freiburg / München.
- Gerke, W. (2015). *Technische Assistenzsysteme vom Industrieroboter zum Roboterassistenten*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg.
- Glatzer, C. (2019). *Entwicklung und Validierung einer Prädiktions-Schnittstelle im Umfeld einer MRK-Roboter-Anwendung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Kassel.
- Gleser, W. D. & Leuschina, L. J. (1979). *Motorische Komponenten des Sehens*. Berlin: VEB Berlin.
- Glück, M. (2018). *CE Produktischerheit - Mensch-Roboter-Kooperation (MRK)*. Zugriff am 02.03.2019 unter <https://www.weka.de/produktsicherheit/mensch-roboter-kooperation-mrk/>

- Gombert, B. & Matthias, B. (2015). *Handling und Montage mit Leichtbauroboter*. VDI Kongress „Industrielle Robotik“. Baden Baden: VDI.
- Gordon, R. (2019). *MIT News: Robot hand is soft and strong*. [Online] Zugriff am 02.04.2019 unter <http://news.mit.edu/2019/new-robot-hand-gripper-soft-and-strong-0315>
- Götze, R. (2015). *Neuropsychologisches Befundsystem für die Ergotherapie* (4. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Graetz, G. & Michaels, G. (2015). *Robots at Work*. CEp Discussion Paper No. 1335. Verfügbar unter cep.lse.ac.uk/pubs/download/dp1335.pdf
- Grüling, B. (15.06.2014). *Neue Fertigungsstraßen im Autobau: Mein Kollege, der Roboter*. Zugriff am 04.02.2016 unter <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/roboter-sollen-menschen-an-fertigungsstrassen-arbeit-abnehmen-a-974088.html>
- Haag, M. (2015). Kollaboratives Arbeiten mit Robotern – Vision und realistische Perspektive. In A. Botthof & E. A. Hartmann (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0* (S. 59-64). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Hackenfort, M. (2017). *Unaufmerksamkeit und Ablenkung*, Zürich: Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaft.
- Haddadin, S., Suppa, M., Fuchs, S. & Bodenmüller, T. (2010). Konzepte für den Roboterassistenten der Zukunft. *at - Automatisierungstechnik*, 58, 695-707.
- Hall, E. T. (1966). *The Hidden Dimensions*. Garden City, New York: Anchor Books as Doubleday Anchor Books.
- Hargutt, V. (2003). *Das Lidschlussverhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen*. VDI-Fortschritt-Bericht Nr. 17 (233). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Häuslein, S., 22.11.2018. *Zykloidgetriebe für extrem hohe Traglasten*. Zugriff am 18.01.2019 unter <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/zykloidgetriebe-fuer-extrem-hohe-traglasten-a-777164/>
- Hehlmann, W. (1963). *Geschichte der Psychologie*. Kröners Taschenausgabe Band 200. Atuttgart: Anfred Kröner Verlag Stuttgart.
- Heinze, R. (2015). Der Ingenieur im Zeitalter von Industrie 4.0. *etz - Elektrotechnik & Automation*, 20-23.

- Helms, E. & Meyer, C. (2005). Assistor – Mensch und Roboter rücken zusammen. *wt Werkstatttechnik*, 677-683.
- Helms, E. (2006). *Roboterbasierte Bahnführungsunterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen*. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag.
- Hempel, J. (2014). *Entwicklung eines Verfahrens zur Erkennung von Fahrerablenkung basierend auf Bedienhandlungen*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- Henrich, D., Fischer, M., Gecks, T. & Kuhn, S. (2008). *Sichere Mensch/Roboter-Koexistenz und Kooperation*. Zugriff am 07.12.2018 unter http://www.ai3.uni-bayreuth.de/resypub/?mode=pub_show&pub_ref=henrich2008a
- Hensel, R. (07.12.2017). *Schweizer Präzision aus Franken - VDI Nachrichten*. Zugriff am 08.03.2019 unter <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik/Schweizer-Praezision-Franken>
- Herkner, W. (1975). *Einführung in die Sozialpsychologie*. Wien: Verlag Hans Huber.
- Hermann, D. A. & Pela, P. (2018). *Arbeitsreport StepStone: Automatisierung - Fachkräfte fürchten nicht um ihren Job*. Zugriff am 25. 10. 2018 unter https://www.stepstone.de/ueber-stepstone/wpcontent/uploads/2018/10/StepStone_Arbeitsreport_Webversion.pdf
- Hinds, P., Roberts, T. L. & Jones, H. (2004). Whose Job Is It Anyway? A Study of Human–Robot Interaction in a Collaborative Task. *HUMAN-COMPUTER INTERACTION* (S. 151–181). United States: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Hirsch-Kreinsen, H. & Weyer, J. (2014). *Wandel von Produktionsarbeit – „Industrie 4.0“*. WSI Mitteilungen 6/2014. Dortmund: Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät Technische Universität Dortmund.
- Höcherl, J., Bottke, C. & Schlegl, T. (2015). Steuerungsarchitektur für kollaborierende Roboter. *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis*, 06, 38-45.
- Höhl, R., 2018. *Was Robotik in der Medizin leisten kann*. Zugriff am 02.03.2019 unter <https://www.aerztezeitung.de/kongresse/kongresse2018/berlin2018-hsk/article/965305/roboterarm-panda-robotik-medizin-leisten-kann.html>

- Holzträger, D. (2012). *Gesundheitsförderliche Mitarbeiterführung - Gestaltung von Maßnahmen der betrieblichen gesundheitsförderung für Führungskräfte*. Hampp, Mering: Rainer Hampp Verlag.
- Hülke, M. (2015). Arbeitsplätze der Industrie 4.0: Kollaborierende Roboter. *DGUV Forum: Fachzeitschrift Prävention, Rehabilitation und Entschädigung*, 03, 10-13.
- International Data Corporation (06.2017). *A Trillion-Dollar Boost: The Economic Impact of AI on Customer Relationship Management*. Framingham: International Data Corporation.
- International Federation of Robotics Statistical (2015). *World-Robotics-Studie: Industrieroboter erobern die Welt*. Zugriff am 31.03.2016 unter <http://www.presseportal.de/pm/115415/3135239>
- International Federation of Robotics (23.03.2016a). *US-Wirtschaft: Autosektor kauft jeden zweiten Industrie-Roboter*. Zugriff am 31.03.2016 unter http://www.worldrobotics.org/uploads/tx_zeifr/2016MRZ23_PM_deutsch.pdf
- International Federation of Robotics (29.09.2016b). *Europäische Union belegt Spitzenplatz im globalem Automations-Wettbewerb*. Welt-Roboter-Report 2016. Frankfurt: econNEWSnetwork.
- Itasse, S. (2019). Schaufenster der Zukunft. *MaschinenMarkt*, 28.
- Joos, M., Rötting, M. & Velichkovsky, B. (2003). Die Bewegung des menschlichen Auges - Fakten, Methoden, innovative Anwendungen. In: *Psycholinguistik/ Psycholinguistics. Ein internationales handbuch / An International Handbook*. Berlin, New York: de Gruyter, 142-168.
- Jopp, K. (2015). Safety und Security. *VDE dialog - Das Technologie-Magazin*, 3, 18-19.
- Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*, Frankfurt / Main: Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft.
- Karlsruher Institut für Technologie, 2018. *Institut für Sport und Sportwissenschaften*. Zugriff am 25. 06. 2018 unter https://www.sport.kit.edu/rd_download/Dienstleistung/EB_Persoelicher_Fragebogen.pdf
- Kast, R. (2014). Herausforderung Führung - Führen in der Mehrgenerationengesellschaft. In M. Klaffke (Hrsg.), *Generationen-Management:*

- Konzepte, Instrumente, Good-Practice-Ansätze* (S. 227-244). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kemmner, G.-A. (2013). Industrie 4.0: Knackpunkt Mensch. *Productivity Management*, 18, 25.
- Kistner, L., Dürrbaum, A. & Kroll, A. (2018). Ein autonomes, mobiles Multi-Robotersystem für Intralogistik in der Produktion. In *VDI-Bericht Nr. 2330 - VDI-Kongress AUTOMATION 2018*. Kassel: VDI.
- Klaiber, D. M. (24.04.2017). Die Zäune müssen weg. *Maschinen Markt - Hannover Messe Daily*, 1, 12-13.
- Klinke, R. (2005a). Bauelemente des Nervensystems. In S. Silbernagel (Hrsg.), *Physiologie* (S. 611-625). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Klinke, R. (2005b). Empfindungen – Wahrnehmungen; Die Verarbeitungsprinzipien in Sinneskanälen. In S. Silbernagel (Hrsg.), *Physiologie* (S. 727-734). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Knoll, A. (03.09.2018). Um Cobots entwickelt sich ein Ecosystem: Automatisierung per Cobot wird Normalität. *Markt&Technik*. Zugriff am 08.03.2019 unter <https://www.elektroniknet.de/markt-technik/automation/automatisierung-per-cobot-wird-normalita-et-157327.html>
- Koch, B. (2002). Mensch und Roboter – ein tolles Team. *Fraunhofer Magazin*, 2, 48-49.
- Koczula, R. (2018). *Analyse und Prädiktion von Trajektorien mittels maschineller Lernverfahren im Kontext der Arbeitssicherheit für die Mensch-Roboter-Kollaboration*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Kassel.
- Köhl, E., Esser, U., Kemmner, A. & Förster, U. (1989). *CIM zwischen Anspruch und Wirklichkeit*. Löln: RKW-Verlag.
- Koppenborg, M. (2012). *Auswirkungen von Autonomie und Geschwindigkeit kollaborierenden Roboter auf die Beanspruchung des Nutzers in virtueller Realität*. Masterarbeit, Universität Bonn.
- Koppenborg, M., Lungfiel, A., Naber, B. & Nickel, P. (2013). Auswirkung von Autonomie und Geschwindigkeit in der virtuellen Mensch-Roboter-Kollaboration. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.), *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung* (S. 417-420). Krefeld: GfA-Press.

- Krebs, S. (2005). *Kulturelle Dispositionen für die Akzeptanz von Robotern*. Zugriff am 09.06.2017 unter <https://www.yumpu.com/de/document/view/24237708/kulturelle-disposition-fa-1-4-r-die-akzeptanz-von-robotern-und->
- Krieger, R. (2009). Mensch-Roboter Kooperation – Einrichten von sicheren Fertigungszellen auf Knopfdruck. In VDI (Hrsg.), *VDI Berichte 2067 - Automation 2009: der Automatisierungskongress in Deutschland* (S. 95-100). Ladenburg: VDI-Verlag.
- Krieger, R., Staab, H., Matthias, B., Behnisch, K. & Kuhlenkötter, B. (2008). Industrieroboter als Produktionsassistenten für die Automobilmontage. In VDI (Hrsg.), *Robotik 2008 (VDI-Berichte; 2012)*. Ladenburg, Friedberg (Hessen): VDI-Verlag.
- Kuhlenkötter, B., (05.09.2018). *Zukunft der Robotik in der Automobilindustrie*. Dortmund: BAuA.
- Land, M. F. & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. In Royal Society (Hrsg.), *Philosophical Transactions of the Royal Society London B: Biological Sciences*, (S. 1231 - 1239). Great Britain: Royal Society. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0105>
- Lange, F. & Hirzinger, G. (2003). Kameragestützte räumliche Regelung von schnellen Roboterarmen. In VDI (Hrsg.), *VDI-Bericht 1800*. Stuttgart: VDI-Verlag.
- Large, M. (29.05.2017). MRK: Mensch und Roboter rücken zusammen. *all-electronics*. Zugriff am 06.03.2019 unter <https://www.all-electronics.de/mrk-mensch-und-roboter-ruecken-zusammen/3/>
- Lass, S. & Kotarski, D. (2014). IT-Sicherheit als besondere Herausforderung von Industrie 4.0. In W. Kersten, H. Koller & H. Lödding (Hrsg.), *Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern* (S. 397-419). Berlin: GITO Verlag.
- Lecke, D. (2019). *FMEA Technologieträger*. Baunatal: Volkswagen Group Components, Planung Getriebe und E-Antrieb.
- Lehmann, H., Walters, M. L., Dumitriu, A., May, A., Koay, K. L., Saez, J., Syrdal, D. S., Wood, L. & Dautenhahn, K. (2013). Artists as HRI Pioneers: A Creative Approach to Developing Novel Interactions for Living with Robots. In University of Hertfordshire (Hrsg.), *Social Robotics* (S. 402-411). Schweiz: Springer International Publishing.

- Lenz, F. (2018). *Digitalisierung und Beschäftigung - Eine Ende ohne Arbeit oder Arbeit ohne Ende?* Berlin: Stiftung Marktwirtschaft.
- Lilli, W. (1978). Die Hypothesentheorie der sozialen Wahrnehmung. In D. Frey (Hrsg.), *Kognitive Theorien der Sozialpsychologie* (S. 19-47). Bern: Verlag Hans Huber Bern.
- Lind, M. (2018). Cobots? Ja nee, is' klar. *Robotik und Produktion*, 4, 16.
- Lüdtke, A. (2015). Wege aus der Ironie in Richtung ernsthafter Automatisierung. In A. Botthof & E. A. Hartmann (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0* (S. 125-148). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Lysaght, R., Hill, S. G. & Dick, A. O. (1989). *Technical Report 851 - Operator Workload: Comprehensive Review and Evaluation of Operator Workload Methodologies*, Fort Bliss, Texas: U.S. Army Research Institute.
- Mandler, G. (1979). *Denken und Fühlen*. Paderborn: Junfermann Verlag.
- Mann, C. L. (2016). *Einführung: Die Politik muss jetzt handeln, damit wir die Wachstumsschwäche endlich überwinden und unsere Versprechen einlösen können*. Paris: OECD Publishing.
- Maschinenrichtlinie (2006). *Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates*. Zugriff am 02.03.2019 unter http://www.ce-wissen.de/wp-content/uploads/2008/12/2006_42_eg_de.pdf#nameddest=2_g
- Matthias, B. (2011). *Sichere MRK in industriellen Anwendungen (Entwicklungsschritte bei ABB Corporate Research)*. VDI/VDE 44. Sitzung des FA 4.13 „Steuerung und Regelung von Robotern“.
- Matthias, B. & Ding, H. (2013). Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage. *Internationales Forum Mechatronics (ifm)*, 10. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/269410966_Die_Zukunft_der_Mensch-Roboter_Kollaboration_in_der_industriellen_Montage
- Matthias, B. & Ding, H., 2014. *Robot system for human-robot collaboration*. Patentnr. WO2014048444A1. Verfügbar unter <https://patentimages.storage.googleapis.com/27/bb/f1/da0ae89559a40e/WO2014048444A1.pdf>
- Matthias, B., Kock, S. & Krieger, R. (2009). *Adaptive Robot System*. Patentnr. WO2009155946A1. Verfügbar unter <https://patentimages.storage.googleapis.com/1d/aa/67/a48101606d2c9f/WO2009155946A1.pdf>

- McKinsey (2017a). *a future that works: automation, employment and productivity*. Brussels, San Fransisco, Shanghai: McKinsey & Company.
- McKinsey (2017b). *Smartening up with Artificial Intelligence (AI) – What's in it for Germany*. Brussels, San Fransisco, Shanghai: McKinsey.
- Meyer, T. (2015). Die Roboter kommen - als Freunde. *develop³ systems engineering*, 3, 44-47.
- Michel, S. (2019). Komponenten für die smarte Produktion. *MaschinenMarkt*, 22-24.
- Mißfeldt, M. (2018). *Aufbau und Funktion des menschlichen Auges*. Zugriff am 11.03.2019 unter <https://www.onlinesehtests.de/auge/>
- Mori, M. (2012). The Uncanny Valley: The Original Essey by Masahiro Mori (übersetzt von MacDorman & Minato). *Robotics & Automation Magazine*, 06. Verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/the-uncanny-valley>
- Müller, B. (2017). *Kollege Roboter*. Zugriff am 18.01.2019 unter <https://www.heise.de/tr/artikel/Kollege-Roboter-3691019.html?seite=all>
- Müller, H. J., Krummennacher, J. & Schubert, T. (2015). *Aufmerksamkeit und Handlungssteuerung - Grundlagen für die Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Müller, R., Franke, J., Henrich, D., Kühlenkötter, B., Raatz, A. & Verl, A. (2019). *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. München: Carl Hanser Verlag.
- Mummendey, H. D. & Grau, I. (2014). *Die Fragebogen-Methode*. Göttingen: Hogrefe Verlag.
- Naar, J. & Fischer, N. (2015). *Interaktionssystem und Verfahren zur Interaktion zwischen einer Person und mindestens einer Robotereinheit*. Patentnr. K 22388 DE wj-sc.
- Naar, J. & Fischer, N. (2016). *Planungsprozess zur Umsetzung neuer Robotersysteme*. Vortrag anlässlich des Konzernplanungstages. Vrachlabi: Volkswagen.
- Naber, B., Lungfiel, A., Nickel, P. & Hülke, M. (2013). Human Factors zu Robotergeschwindigkeit und –distanz in der virtuellen Mensch-Roboter-Kollaboration. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.), *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung - 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (S. 421-424). Dortmund: GfA-Press.

- Neser, S. (18.-19.02.2019). *Grundlagen der Robot-Vision (VDI Seminar 02SE309011)*, Düsseldorf: VDI Wissenforum.
- Niesing, B., 2/2014. Roboter - Kollegen mit Kraft. *weiter.vorn: Das Fraunhofer-Magazin*, 8-13.
- Nomura, T., Kanda, T. & Suzuki, T. (2005). *Experimental investigation into influence of negative attitudes toward robots on human–robot interaction*, London: Springer-Verlag. Zugriff am 03.01.2019 unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.59.6397&rep=rep1&type=pdf>
- Nomura, T., Suzuki, T. & Kanada, T. (2006). *Altered Attitudes of People toward Robots: Investigation through the Negative Attitudes toward Robots Scale*. Technical Report. Zugriff am 11.01.2019 unter <https://www.aaai.org/Papers/Workshops/2006/WS-06-09/WS06-09-006.pdf>
- Nördinger, S. (2018). *Mensch-Roboter-Kollaboration: So greifen Cobots sicher und handzahn - Produktion*. Zugriff am 08.03.2019 unter <https://www.produktion.de/trends-innovationen/so-greifen-cobots-sicher-und-handzahn-208.html>
- Nuber, C., Köhler, C. & Schultz-Wild, R. (1989). CIM in der Bundesrepublik (Teil 1): Technisch und sozial noch ganz am Anfang. *Technische Rundschau*, 8, 30-43.
- Ollermann, F. (2007). *Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit von Online-Shops*. Dissertation, Universität Osnabrück Fachbereich Humanwissenschaften, Institut für Psychologie.
- Ore, F. (19.11.2014). *Virtual simulation of industrial human-robot collaboration*. Doctorial project presentation, Mälardalen University.
- Ortmann, U. & Gohlke, B. (2014). *Konzepte zur sozial- und humanverträglichen Gestaltung von Industrie 4.0*. Zugriff am 04.11.2016 unter <http://www.uni-bielefeld.de/soz/las/TA/itsowl/>
- Ostermann, B. (2014). *Entwicklung eines Konzepts zur sicheren Personenerfassung als Schutzeinrichtung an kollaborierenden Robotern*. Zugriff am 11.09.2015 unter [<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20140702-113540-2>]
- Paeschel, S. (2018). Mehr als nur eine Schnittstelle. *IEE: Industrie Engineering Effizienz*, 10, 52-54.

- Pape, H.-C. (2005). Integrative Funktionen des Gehirns. In S. Silbernagl et al. (Hrsg.), *Physiologie* (S. 801-834). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Pfeiffer, T. (2019). *Virtual Reality*. Zugriff am 09.07.2019 unter <https://techfak.de/~tpfeiffe/lehre/VirtualReality/slides/images/?C=S;O=D>
- Pfendler, C. (1990.), Zur Messung der mentalen Beanspruchung mit dem NASA-Task Load Index. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 158-163.
- Pfendler, C. (1993). Vergleich der Zwei-Ebenen-Intensitäts-Skala und des NASA Task Load Index bei der Beanspruchungsbewertung während Lernvorgängen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 26-33.
- Polasek, W. (1997). *Schließende Statistik: Einführung in die Schätz- und Testtheorie für Wirtschaftswissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Porst, R. (2014). *Fragebogen: Ein Arbeitsbuch*. (4. Aufl.). Wiesbaden: Springer Verlag.
- Posner, M. (1980). Orienting of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25.
- Pot, J. H. J. van der (1985). *Die Bewertung des technischen Fortschritts: eine systematische Übersicht der Theorien - Band 2*, Assen / Maastricht: Van Garsum.
- Pupil Labs (2016a). *Pupil Labs - Getting Started*. Zugriff am 20.12.2016 unter <https://github.com/pupil-labs/pupil/wiki/Getting-Started>
- Pupil Labs (2016b). *Pupil Labs - Environment*. Zugriff am 20.12.2016 unter <https://github.com/pupil-labs/pupil/wiki/Environment>
- Pupil Player, 2016c. *Pupil Labs - Pupil Capture*. Zugriff am 20.12.2016 unter <https://github.com/pupil-labs/pupil/wiki/Pupil-Capture>
- Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction - An Approach to Cognitive Engineering*. New York: Elsevier Science Publishing Co. Inc.
- Reddehase, M. (2019). Die Dos and Don'ts auf dem Weg zur Industrie 4.0. *MaschinenMarkt*, 2, 64-66.
- Reich, N. & Eyssel, F. (2013). Attitudes towards service robots in domestic environments: The role of personality characteristics, individual interests, and demographic variables. *Paladyn - Journal of Behavioral Robotics*, 4(2), 123-130.

- Reininger, G. (2016). Hand-in-Hand - Die Mensch-Roboter-Kollaboration wird Realität. *antriebstechnik*, 6, 60-61.
- Reitelshöfer, S., Ladgraf, M. & Franke, J., (21.09.2017). *Dielektrische Elastomere - Ein Werkstoff für künstliche Muskeln und weiche Sensoren*. Zugriff am 02.03.2019 unter <https://medizin-und-technik.industrie.de/technik/forschung/ein-werkstoff-fuer-kuenstliche-muskeln-und-weiche-sensoren/>
- Renn, O. (09.2014). *Der große Bruder kommt als Algorithmus: Ortwin Renn über die gesellschaftlichen Risiken der Automatisierung*. Interview. Zugriff am 09.06.2017 unter <https://www.brandeins.de/archiv/2014/arbeit/ortwin-renn-im-interview-risiken-der-automatisierung-der-grosse-bruder-kommt-als-algorithmus/>
- Richer, G. (2000a). *Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse - Forschungsergebnisse für die Praxis - Psychische Belastung und Beanspruchung*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Richter, G. (2000b). *Psychische Belastung und Beanspruchung - Stress, psychische Ermüdung, Monotonie, psychische Sättigung*. Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr. 116 Hrsg. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Riedel, S. (2003). Die Grundlagen der ergonomischen Griffgestaltung am Beispiel einer Heckenschere. In K. Landau (Hrsg.), *Good Practise - Ergonomie und Arbeitsgestaltung* (S. 1-12). Stuttgart: ergonomia Verlag oHG.
- Rizzolatti, G., Riggio, L., Dascola, I. & Umiltà, C. (1987). Reorienting attention across the horizontal and vertical meridians: evidence in favor of a premotor theory of attention. *Neuropsychologia*, 25(1A), 31-40.
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38 (4), 193-200.
- Rohwedder, J. (2005). Nischentrend bremst Roboter. *Automobil-Produktion*, 12, 40.
- Rosenthal-von der Pütten, A. M. (2014). *Uncannily Human - Experimental Investigation of the Uncanny Valley Phenomenon*. Zugriff am 30.11.2017 unter http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet/Document-34866/Rosenthal-v.d.P_Diss.pdf
- Rosetta (2013). *Rosetta Final Summary Report*. Zugriff am 18.01.2019 unter <http://fp7rosetta.org/?q=node/11>

- Rosetta (2015). *Rosetta*. Zugriff am 21.06.2015 unter <http://www.fp7rosetta.org/?q=node/2>
- Rösler, F. (2011). *Psychophysiologie der Kognition: Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft*. Heidelberg: Springer.
- Rötzer, I. (2003). Die Kobots kommen. *Handling*, 12, 20-21.
- Rüdiger, A. (2017). Was tun, wenn die Roboter kommen?. *CIOBRIEFING - Technology-Update für IT-Manager*, 8, 18-21.
- Rumsch, W.-C., Kruse, D. J. & Köhler, F. (2014). *Technology Watch Studie: Roboter in Kooperation: Mensch - Roboter - Produkt*, Berlin: Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mgH.
- Sauer, O. & Jasperneite, J. (2011). *Adaptive information technology in manufacturing*, Karlsruhe, Lemgo: Fraunhofer IOSB.
- Schächinger, H. (2014). Konzept individueller körperlicher Reaktionsstereotypen. In: W. Rief & P. Henningsen (Hrsg.), *Psychosomatik und Verhaltensmedizin* (S. 214-218). Stuttgart: Schattauer.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2010). *Arbeitswissenschaft*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schmaltz, M. A. (2009). *Methode zur Messung und Steigerung der individuellen Akzeptanz von Informationslogistik in Unternehmen*, Berlin: Logos Verlag.
- Schmedding, K. (2012). *Leichtkollisionen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag & Springer Fachmedien.
- Schmitz, W. (2019). Viel Arbeit auf der Baustelle Gesundheit 4.0. *VDI Nachrichten*, 9, 20-21.
- Schmitz, W. & Reckter, B. (01.03.2019). Riskante neue Arbeitswelt. *VDI Nachrichten*, 9, 1.
- Schneider, M. (1971). *Einführung in die Physiologie des Menschen*. Berlin: Springer.
- Schuhmacher, P. (2012). Blickaufzeichnung in der Rezeptionsforschung: Befunde, Probleme und Perspektiven. In P. Schuhmacher & H. Bucher (Hrsg.), *Interaktionale*

- Rezeptionsforschung: Theorie und Methode der Blickaufzeichnung in der Medienforschung* (S. 111-134). Wiesbaden: Springer.
- Schünke, M., Schulte, E. & Schumacher, U. (2009). *PROMETHEUS - LernAtlas der Anatomie* (2. Aufl.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Schuster, S. A. (2013). *Akzeptanz organisationaler Veränderungen: Eine experimentelle Studie zur Implementierung und Wirkung variabler Vergütung*. Lohmar-Köln: Josef Eul Verlag.
- Schwarzkopf, P. (2015). *VDMA Presse-Statement: Roboter kurbeln Wirtschaft an*. Zugriff am 04.02.2016 unter https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwirv_XL_OrLAhVEqQ4KHUvCDhoQFggnMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.vdma.org%2Fdocuments%2F106005%2F8452765%2FStatement_Schwarzkopf_PK_VDMA_R%252BA_2015-06-11.doc%2F8611ff8e-d216-4237-9b21-2758
- Schwentker, B. (14.10.2016a). *Auswertung der Datensätze für den "Job-Futuromat" - Ersetzt durch Kollege "Roboter" (Teil 1)*. Zugriff am 09.06.2017 unter http://www.ard.de/home/themenwoche/Digitalisierung_der_Arbeit/3598690/index.html?articleSectionIndex=0
- Schwentker, B. (14.10.2016b). *Ersetzt durch Kollege "Roboter" - Mensch mit Maschine (Teil 2 des Beitrags)*. Zugriff am 09.06.2017 unter http://www.ard.de/home/themenwoche/Digitalisierung_der_Arbeit/3598690/index.html?articleSectionIndex=1
- Severinson-Eklundh, K., Green, A. & Hüttenrauch, H. (2002). *Social and collaborative aspects of interaction with a service robot*. Workshop on "Robot as Partner: an exploration of social robot". Lausanne: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Verfügbar unter "https://www.researchgate.net/publication/222650128_Social_and_collaborative_aspects_of_interaction_with_a_service_robot
- Siegert, H.-J. & Bocionek, S. (1996). *Robotik: Programmierung intelligenter Roboter*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Soder, J. (2014). Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In T. Bauernhansel (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik* (S. 85-102). Wiesbaden: Springer Verlag.

- Sonnenberg, V. (17.01.2017). *MRK-Greifer sind die Sensiblen und Intelligenten ihrer Art*. Zugriff am 18.01.2017 unter <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/mrk-greifer-sind-die-sensiblen-und-intelligenten-ihrer-art-a-573336/>?
- Spath, D., Schimpf, S. & Lang-Koetz, C. (2010). *Technologiemonitoring - Technologien identifizieren, beobachten und bewerten*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Stach, B. (01.10.2015). *Begleitforschung zur Implementierung eines kollaborierenden Roboters in der Produktion*, Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.
- Statistisches Bundesamt (2011). *Demografischer Wandel in Deutschland: Bevölkerung und Haushaltsentwicklung im Bund und in den Ländern*. Zugriff am 20.04.2015 unter https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DEHeft_heft_00023008
- Statistisches Bundesamt (2016a). *Beschäftigte in der deutschen Automobilindustrie in den Jahren 2005 bis 2015*. Zugriff am 31.03.2016 unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/30703/umfrage/beschaefigtetenzahl-in-derautomobilindustrie/>
- Statistisches Bundesamt (2016b). *Roboterdichte in der Automobilindustrie und allgemeinen Industrie nach ausgewählten Ländern weltweit im Jahr 2013*. Zugriff am 31.03.2016 unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/369526/umfrage/roboterdichte-in-der-automobilindustrie-undallgemeinen->
- Statistisches Bundesamt (2016c). *Höhe des durchschnittlichen Bruttolohns/Bruttogehalts im Monat je Arbeitnehmer in Deutschland 1991 bis 2015*. Zugriff am 14.04.2016 unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/161355/umfrage/monatliche-bruttoloehne-und-bruttogehaelter-prokopf->
- Statistisches Bundesamt (2016d). *Absatz von Insustrierobotern weltweit in den Jahren 2004 bis 2018*. Zugriff am 14.04.2016 unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/29386/umfrage/weltweiter-absatz-fuer-industrie-roboter-seit-2004/>
- Statistisches Bundesamt (2016e). *Demographische Standards – für persönliche und schriftliche Befragungen*. Zugriff am 10.04.2017 unter <https://www.destatis.de/DE/Methoden/DemografischeRegionaleStandards/DemografischeStandardsInfo.html>
- Statistisches Bundesamt (2017). *Zahl der Woche vom 27. Juni 2017*. Zugriff am 22.02.2019 unter https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2017/PD17_26_p002pdf.pdf?__blob=publicationFile

- Statistisches Bundesamt (2018). *13th coordinated Population Project for Germany*. Zugriff am 25.06.2018 unter <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/#!y=2015>
- Statistisches Bundesamt (2019). *Deutschland: Anteil der "inaktiven" Bevölkerung ab 65 Jahre an der gesamten Erwerbsbevölkerung von 2000 bis 2050*. Zugriff am 08.03.2019 unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/14177/umfrage/deutschland-anteil-rentner-an-erwerbsbevoelkerung/>
- Stäubli (2018). *Roboterbaureihe TX60*. Zugriff am 07.12.2018 unter <https://www.staubli.com/de-ch/file/5285.show>
- Strassmann, B. (19.01.2012). *Zeit Online - Künstliche Intelligenz: Die Roboter kommen*. Zugriff am 31.03.2016 unter <http://www.zeit.de/2012/04/T-Roboter/komplettansicht>
- Sträter, O. (2005). *Cognition and safety - An integrated approach to systems design and assessment*. Hampshire [u.a.]: Ashgate.
- Sträter, O., Siebert-Adzic, M. & Schäfer, E. (2012). *Gesundes Führen für effiziente Organisationen der Zukunft*. In S. Grote (Hrsg.), *Die Zukunft der Führung* (S. 307-330). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Surdilovic, D., Bastidas-Cruz, A., Radojicic, J. & Heyne, P. (2018). *Interaktionsfähige intrinsisch sichere Roboter für vielseitige Zusammenarbeit mit dem Menschen*, Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Survio (2018). *DE Demographischer Fragebogen*. Zugriff am 25.06.2018 unter <https://www.survio.com/umfragevorlage/de-demographischer-fragebogen>
- SVG Silh (2019). *Gehirn Mensch Karosserie Anatomie*. Zugriff am 11.03.2019 unter <https://svgsilh.com/de/e91e63/image/155655.html>
- Taylor, J., Shotton, J., Sharp, T. & Fitzgibbon, A. (2012). *The Vitruvian Manifold: Inferring dense Correspondences for One-Shot Human Pose Estimation*. Zugriff am 31.03.2016 unter <http://research.microsoft.com/pubs/162510/vm.pdf>
- The New York Times (07.03.1972). *Revolt of the Robots*. *The New York Times*, 38. Zugriff am 09.06.2017 unter http://www.nytimes.com/1972/03/07/archives/revolt-of-the-robots.html?_r=0,
- Thiemermann, S. (2005). *Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter*, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag.

- Thiemermann, S. & Uffelen R. van (2004). *Verfahren zur überwachten Kooperation zwischen einer Robotereinheit und einem Menschen*. Patentnr. DE 103 20 343 A1. München: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
- Tontsch, R. (2015). *Innovative Konzepte mit Sonderkinematiken*. Zugriff am 18.01.2019 unter <https://automationspraxis.industrie.de/allgemein/innovative-konzepte-mit-sonderkinematiken/>
- Trepel, M. (2012). *Neuroanatomie - Struktur und Funktion* (5. Aufl.) München: Elsevier GmbH.
- Universal Robots (2014). *Universal Robots: Benutzerhandbuch*. Zugriff am 05.04.2019 unter https://www.pi4.de/fileadmin/material/Produktkatalog/Universal_Robots/Aktualisiert_06.01/UR10_User_Manual_DE.pdf
- Unser, J. (2009). *Das Produktionssystem*, Wolfsburg: Volkswagen AG.
- Veigt, M., Lappe, D. & Hribernik, K. A. (2013). Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. *Industrie Management*, 29, 15-18.
- Verband der Automobilindustrie, (2019). *Automobilproduktion: Zahlen zur Automobilproduktion im In- und Ausland*. Zugriff am 25.01.2019 unter <https://www.vda.de/de/services/zahlen-unddaten/jahreszahlen/automobilproduktion.html>
- Verein Deutscher Ingenieure (1990). *VDI Richtlinie 2860, Blatt1: Handhabungsfunktionen*, Berlin: Beuth-Verlag.
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2014). *Erfolgsmuster und Trends in der deutschen Robotik- und Automationsbranche: Handlungsansätze für mehr Wachstum und Profitabilität*. Frankfurt/Main: McKinsey & Company.
- Vetter, J. (2014). Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration. *A&D-Kompendium*, 123-124.
- Volkswagen AG (2015). *Leitlinien für MRK-Anwendungen, Kapitel Arbeitsgestaltung - Chancen für eine teamorientierte Roboterassistenz*. Wolfsburg: MRK Arbeitsteam "Arbeitsgestaltung".
- Wagner, K. (2018). *Alles im Griff: Greifer werden leichter, flexibler, smarter sowie kommunikativer und kollaborativer*. Zugriff am 18.01.2019 unter <https://automationspraxis.industrie.de/allgemein/alles-im-griff/>
- Walz, J.-D. (2018). *Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA - Mediendienst*, 3. Zugriff am 25. 06. 2018 unter

- https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Presse/Presseinformationen/2018/Maerz/MedienDienst_03_2018_web_offen.pdf
- Weber, M.-A. (2017). *Mensch-Roboter-Kollaboration*. Zugriff am 06.03.2019 unter https://www.arbeitswissenschaft.net/fileadmin/Downloads/Angebote_und_Produkte/Zahlen_Daten_Fakten/ifaa_Zahlen_Daten_Fakten_MRK.pdf
- Weidner, R. (2015). *LaFT - smart ASSIST*. Zugriff am 09.04.2015 unter <http://www.humanhybridrobot.info/wp-content/uploads/2015/01/smart-ASSIST.pdf>
- Wentura, D. & Frings, C. (2013). *Kognitive Psychologie*. Wiesbaden: Springer.
- Werth, L., Steidle, A., Hubschneider, C., de Boer, J. & Sedlbauer, K. (2013). Psychologische Befunde zu Licht und seiner Wirkung. *Bauphysik*, 35, 193-204. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG.
- Westkämper, E., Zahn, E., Balve, P. & Tilebein, M. (2000). Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. *Werkstattstechnik*, 1/2, 22-26.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources an performance prediction. In N. Moray (Hrsg.), *Ergonomics: Psychological mechanisms and models in ergonomics* (S. 159-177). Illinois: Taylor & Francis.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall Inc..
- Wilk, C. (2018). *Übernahme für 285 Millionen Dollar: Teradyne kauft Universal Robots - Produktion*. Zugriff am 08.03.2019 unter <https://www.produktion.de/nachrichten/unternehmen-maerkte/teradyne-kauft-universal-robots-279.html>
- Winkler, B. (2008). *Konzept zur Sicherer Mensch-Roboter-Kooperation auf Basis von Schnellen 3-D Time-of-Flight Sensoren*. Stuttgart: Fraunhofer IPA.
- Wittling, W. (1976). *Einführung in die Psychologie der Wahrnehmung*. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Wolf, A., Becker, R., Schunk, H. & Steinmann, R. (2016). *Greifer in Bewegung: Faszination der Automatisierung von Handhabungsprozessen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Wolf, C. (2016). *Einflussfaktoren auf das Zustandekommen von Intergruppenkontakt: Wann anders nicht schlechter ist*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Zerbel, M. (27.11.2017). *Künstliche Intelligenz: Der feinfühlige Roboter für jedermann - WELT*. Zugriff am 08. 03. 2019 unter <https://www.welt.de/regionales/bayern/article170995126/Der-feinfuehlige-Roboter-fuer-jedermann.html>

Zhao, C., Pan, W. & Hu, H. (2013). Interactive indoor environment mapping through visual tracking of human skeleton. *Int. J. of Modelling, Identification and Control*, 20, 319-328.

Zimmermann, T. (2019). Open-Source-Software für die Robotik als Innovationsfaktor. *MaschinenMarkt*, 4, 58-60.

Zühlke, D. (2012). *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Anhang

	Anzahl der Achsen	Leichtbau	Reichweite [mm]	Mobile Plattform	Autonom, mobile Plattform	Dualarm-System	Stand-By MRK tauglich	Direkte MRK tauglich	Art der Sensitivität	Integrierte Kameratechnik
KUKA LBR iiwa	7	++	800 - 820	O	O	O	++	++	Momenten-Sensorik	O
KUKA KMR iiwa	7	++	800 - 820	O	++	O	++	++	Momenten-Sensorik, Laserscanner, Ultraschallsensoren	O
Fanuc CR7-iA / CR35-iA	6	--	717 / 1813	O	O	O	+	++	Kraft- und Momenten-Sensorik im Sockel	O
Bosch APAS	6	--	911	+	O	O	+	+	Schutzhülle, Kapazitiv	++
Universal Robots UR 3 / 5 / 10	6	++	500 / 850 / 1300	O	O	O	++	-	Stromüberwachung	O
ABB YuMi		++	559	+	O	++	++	+		++
MRK-Systeme KR5Si	6	--	1423	O		O		+	Taktile Schutzhülle	
Franka Panda	7	++	855	O	O	O	++	++	Momenten-Sensorik	O
Rethink Robotics Sawyer	7	++	1260	++	O	O	++	+	Messwertgeber	++
Stäubli Helmo / TX2	6	-	1450	++	+	O	++	+	Laserscanner, taktile Haut	+

Legende: -- Nicht zutreffend; O nicht zutreffend; + teilweise erfüllt; ++ voll erfüllt

Anhang 1: Übersicht ausgewählter Robotermodelle auf dem Markt (vgl. Cobotsguide, 2017)

Parasympathikus Miosis (max. Pupillenverengung)	Sympathikus Mydriasis (max. Pupillenerweiterung)
Licht	Dunkelheit
Schlaf, Ermüdung	Höhere mentale Beanspruchung, Erschrecken
Fokussierung in der Nähe (Akkommodation)	Fokussierung in der Ferne
Miotika (Parasympathomimetika)	Mydriatika (z.B. Adrenalin)
Horner-Syndrom	Okulomotoriusparese
Morphinabusus	Migräneanfall, Glaukomanfall, Schmerzen, Physische Erkrankung
Pontine Läsion, Meningitis	Läsion im Mittelhirn
Narkose	Kokain

*Anhang 2: Auswirkungen für Miosis und Mydriasis
nach Fießl und Middecke (Schünke et al., 2009, S. 150; Trepel, 2012, S. 296; Schlick et al., 2010, S. 405)*

Statistische Auswertung

Ein t-Test vergleicht zwei Stichproben miteinander auf ihre Signifikanz. Der Test wird mittels zweier Hypothesen beschrieben, der Nullhypothese H_0 und der Alternativhypothese H_1 . Ein t-Test unterliegt dabei der Standardannahme, dass die Nullhypothese anzunehmen ist (Akkerboom, 2012, S. 207).

Eine grundsätzliche Voraussetzung für einen t-Test ist die Normalverteilung der Stichprobe. Bei einer kleinen Stichprobe mit $n < 30$ kann nach dem Grenzwerttheorem nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden (Bortz, 2005, S. 137). Die Annahme einer Normalverteilung erfolgt erst bei einer größeren Stichprobe mit $n > 30$ (Bortz, 2005, S. 144).

t-Tests können als einseitige oder zweiseitige Tests durchgeführt werden. Die Wahl des Tests ist davon abhängig, ob eine Abweichung von der Nullhypothese in eine oder in zwei Richtungen untersucht werden soll (Akkerboom, 2012, S. 207).

Die Stichproben können dabei voneinander abhängig oder unabhängig sein. Bei zwei voneinander unabhängigen Stichproben haben die Objekte der Grundgesamtheiten keinen Einfluss aufeinander. Sollen jedoch die Objekte zweier Stichproben paarweise miteinander verglichen werden, müssen diese aus einer Grundgesamtheit stammen,

d. h. die Stichproben sind voneinander abhängig (Bortz, 2005, S. 143). Eine Versuchsreihe mit einer gleichbleibenden Gruppe von Probanden, erfordert einen abhängigen t-Test.

Bei der Betrachtung von zwei abhängigen Stichproben ist zu beachten, ob die Varianzen der beiden Stichproben einander beeinflussen oder nicht. Der Standardfehler einer Stichprobe kann dabei ebenso bei der zweiten Stichprobe bestehen, wodurch die Gefahr besteht, dass dieser zweifach in die Auswertung einfließt. Wenn zwei Stichproben miteinander korrelieren, haben beide eine starke Abweichung vom Mittelwert.

Die Fehlerwahrscheinlichkeit durch die doppelte Berücksichtigung der gleichen Varianz kann vermieden werden, indem für die Messwertpaare die Differenz verwendet wird. Bei der Betrachtung der Differenz, wird somit die Entwicklung des Messwertpaares über die betrachteten Stichproben analysiert, wobei das Niveau einer Stichprobe inklusive der möglichen doppelten Varianz nicht berücksichtigt wird (Bortz, 2005, S. 144):

$$d_i = x_{i1} - x_{i2}$$

Über die gesamte Stichprobenverteilung kann auch das arithmetische Mittel der Differenzen betrachtet werden (Bortz, 2005, S. 144):

$$\bar{x}_d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

Bei dieser Betrachtungsweise stellt n die Anzahl der Messwertpaare dar.

Die Streuung der Verteilung von Differenzmittelwerten berechnet sich nach folgender Formel (Bortz, 2005, S. 144):

$$\sigma_{\bar{x}_d} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{n}}$$

Die Beziehung der Streuung der Differenz wird durch die Stichprobendifferenz geschätzt (Bortz, 2005, S. 144):

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{x}_d)^2}{n - 1}}$$

Vor einer Testdurchführung muss immer das Signifikanzniveau α festgelegt werden. Dieser Wert gibt an, zu welchem Wahrscheinlichkeits-Niveau der durchgeführte Test signifikant ist, d. h. „die Wahrscheinlichkeit, dass eine wahre Nullhypothese irrtümlich abgelehnt wird“ (Frost, 2017, S. 23). Typische Werte für ein Signifikanzniveau sind $\alpha = 0,10$; $0,05$ oder $0,01$ (Akkerboom, 2012, S.207).

Der t-Wert der Differenz ergibt sich aus folgendem statistischen Zusammenhang (Bortz, 2005, S. 144):

$$t = \frac{\bar{x}_d - \mu_d}{\sigma_{\bar{x}_d}}$$

Der t-Wert wird daraufhin mittels der entsprechenden Tabelle mit dem kritischen t-Wert des Signifikanzniveaus verglichen. Die betrachteten Messpaare können als signifikant betrachtet werden, wenn der berechnete t-Wert größer als der t-Wert nach der Tabelle des Signifikanzniveaus und $df = n - 1$ ausfällt.

Der p-Wert beschreibt die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt der beobachteten Stichprobe, während angenommen wird, dass die Nullhypothese gilt.

Dieser Wert wird bei computerbasierten Tests, beispielsweise bei Microsoft Excel verwendet. Mittels p-Wert wird das Risiko betrachtet, dass die Nullhypothese zu Unrecht abgelehnt wird. Das festgelegte Signifikanzniveau wird in einem Testdurchlauf mit dem errechneten p-Wert, dem empirischen Signifikanzniveau verglichen. Die Nullhypothese ist abzulehnen wenn folgendes gilt (Polasek, 1997, S. 146; Bortz, 2010, S. 107):

$$p = 1 - (1 - \alpha)^n < \alpha$$

Um die Signifikanzniveaus von verschiedenen Paarvergleichen, wie zu einer gemeinsamen Referenzgröße, zu vergleichen, ist die Berechnung der Effektgröße ε erforderlich (Bortz, 2005, S. 120):

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2} * (\mu_1 - \mu_0)}{\sigma}$$

Neben dem t-Test bietet die Korrelationsstärke eine weitere Möglichkeit des Vergleichs zweier Messwertreihen. Eine Korrelation kann sowohl negativ als auch positiv ausfallen. Für abhängige Stichproben weist eine negative Korrelation auf eine geringere Teststärke des t-Tests hin. Hierfür kann alternativ der Wilcoxon-Test verwendet werden (Bortz, 2005, S. 144).

Der Korrelationskoeffizient r beschreibt den Zusammenhang von zwei Merkmalen als einen Wert zwischen -1 und +1. Bei einem Wert von -1 handelt es sich um eine perfekt negative Korrelation und bei einem Wert von +1 um eine perfekt positive Korrelation. Für $r = 0$ ist, liegt kein linearer Zusammenhang der Messwerte vor (Bortz, 2005, S. 206).

Die Berechnung Korrelationskoeffizienten r erfolgt durch das durchschnittliche Produkt von korrespondierenden z-Werten (Bortz, 2005, S. 205):

$$r = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n z_{xi} * z_{yi}$$

Durch Mengenverknüpfungen wird die Beziehung von zwei Mengen auf verschiedene Weisen dargestellt werden.

Die Menge A kann eine Teilmenge von Menge B sein. In diesem Fall ist jedes Element von Menge A auch gleichzeitig ein Element von Menge B:

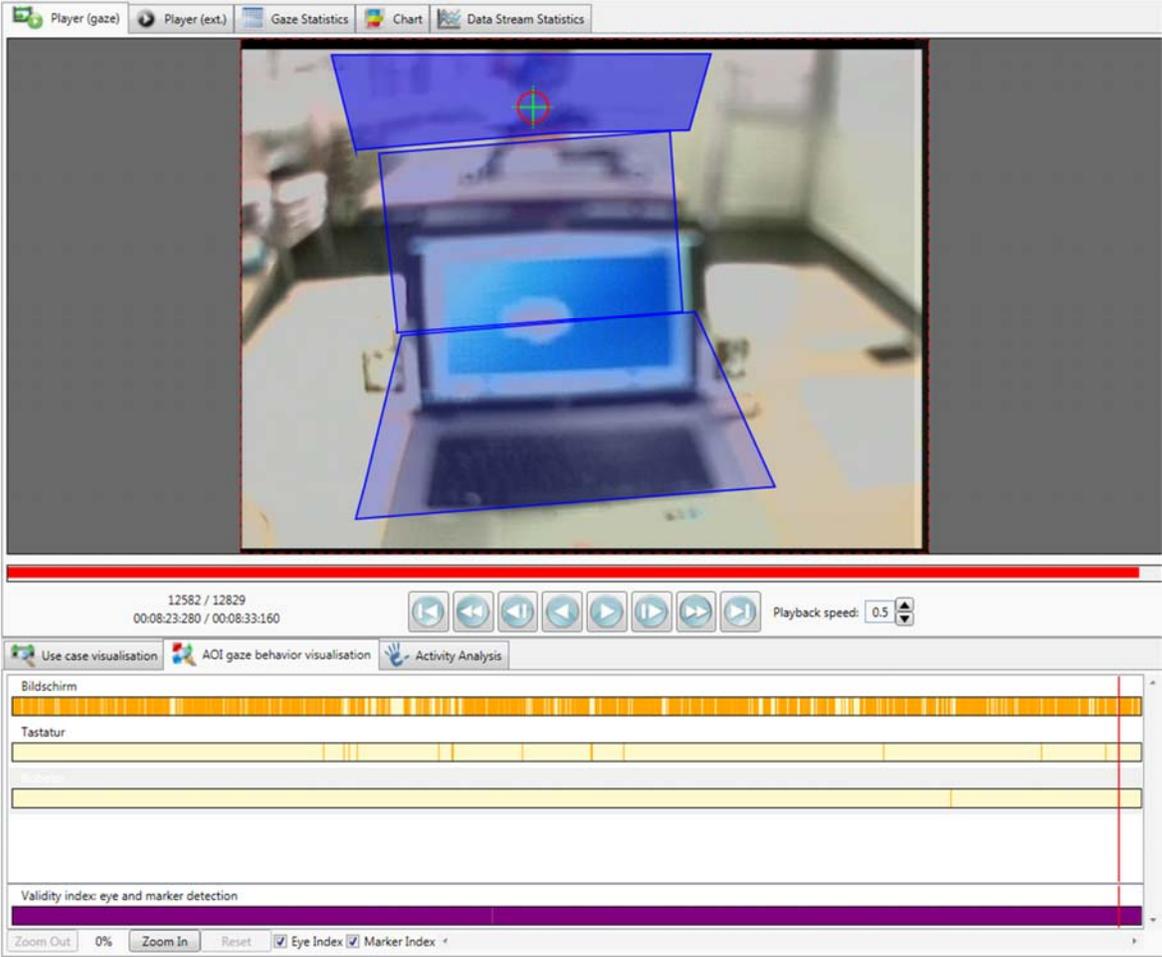
$$A \subseteq B$$

Die Vereinigungsmenge beschreibt die Summe aller Elemente, die entweder zu Menge A oder zu Menge B gehören:

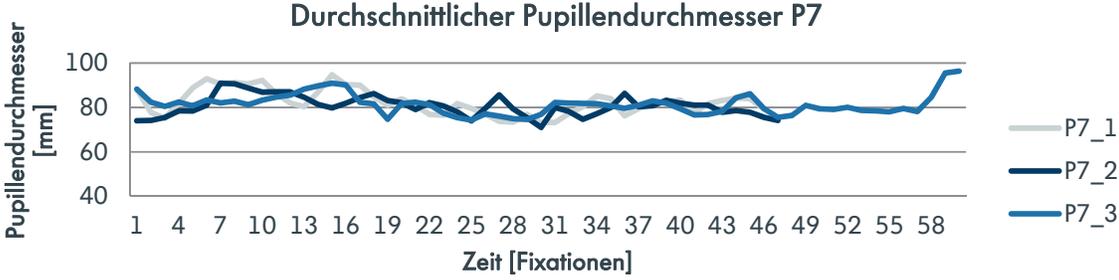
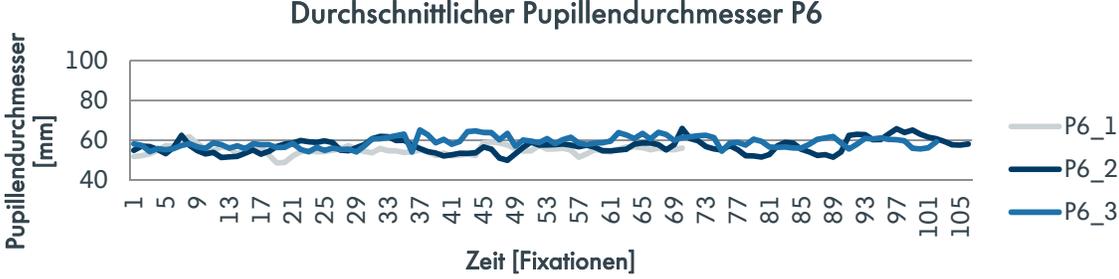
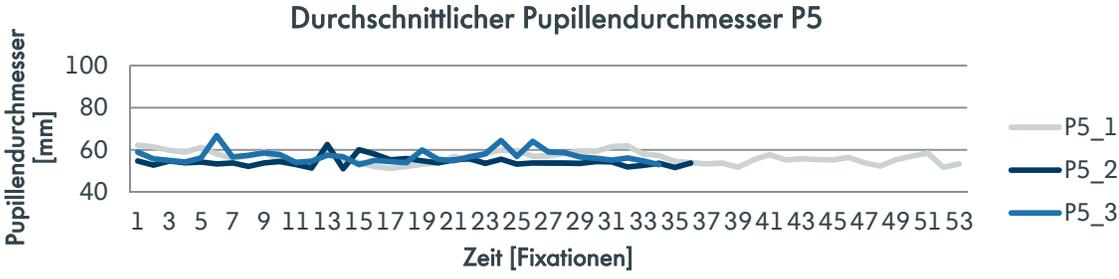
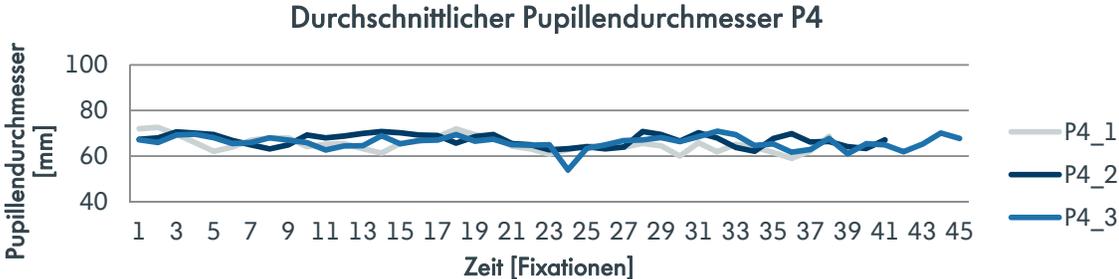
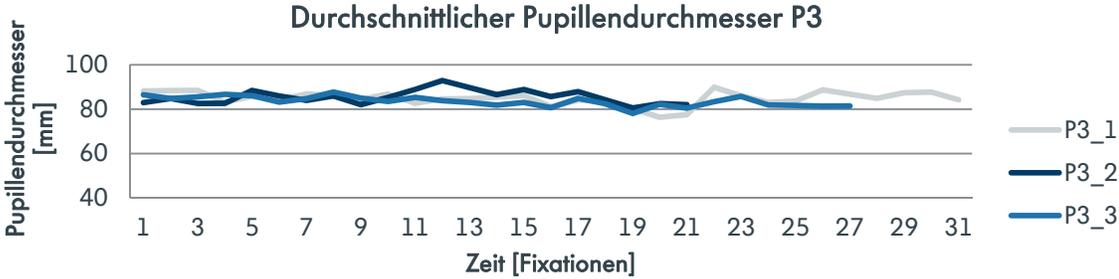
$$A \cup B$$

Die Schnittmenge beinhaltet diejenigen Elemente, die gleichzeitig zu A und zu B gehören:

$$A \cap B$$



Anhang 4: Vorversuch 1 – Auswertung mittels Dikablis Software



Anhang 5: Durchschnittlicher Pupillendurchmesser der Probanden P3 – P7

Nr.	Fehlerquelle	Potentielle Fehler	Folge des Fehlers	Fehlerursache	Derzeitiger Zustand			Verbesserter Zustand				
					Kontroll-/Prüfmaßnahmen	A* B*	RPZ*	Empfohlene Maßnahmen	A* B*	RPZ*		
1.	Roboter	Kollision mit Mitarbeiter	Transienter Kontakt	Fehlverhalten Mitarbeiter	Regelmäßige Grenzwertüberwachung	7	7	49	Einweisung und Unterweisung des Mitarbeiters über Restrisiko	5	2	10
2.	Roboter	Kollision mit Mitarbeiter mit biomechanischen Belastungen oberhalb zulässiger Grenzwerte	Transienter Kontakt mit Verletzungspotential	Verfahrerschwindigkeit zu hoch	Regelmäßige Grenzwertüberwachung	7	9	56	Reduzierung der Verfahrgeschwindigkeit	1	9	9
3.	Roboter	Kollision mit Mitarbeiter in nicht zulässigen Körperregionen	Transienter Kontakt mit Verletzungspotential	Falsche Bewegungsbahn des Roboterarms	Wahl des zulässigen Programmablaufs vor Durchführung überprüfen	5	8	40	Bewegungsbahn hinsichtlich Vermeidung einer Kontaktsituation im nicht zulässigen Bereich auslegen.	1	8	8
4.	Greifer	Kollision mit Hand mit biomechanischen Belastungen oberhalb zulässiger Grenzwerte	Quetschsituation	Fehlverhalten Mitarbeiter	Regelmäßige Grenzwertüberwachung und Überprüfung der angebrachten Polsterung auf	3	9	27	Einweisung und Unterweisung des Mitarbeiters über Restrisiko	3	2	6
5.	Greifer	Hält Dose nicht fest	Dose fällt aus Greifer	Defekt in der Pneumatikversorgung	Regelmäßige Funktionstests	2	5	10	Dose mit geringem Gewicht entwickeln	2	1	2
6.	Greifer	Einklemmen der Finger in Greifer	Quetschsituation Finger	Fehlverhalten Mitarbeiter	Zustand der Greiferbacken überprüfen	3	8	24	Konstruktion der Greiferbacke, welche einen Einklemmmöglichkeit verhindert	0	8	0

* Risikoprioritätszahl(RPZ) aus Auftretenswahrscheinlichkeit(A)* x Bedeutung(B)

Anhang 6: FMEA der Roboterapplikation im Trainingskonzept „Sensibilisierung Industrie 4.0“ (Lecke, 2019)