

Aus dem Bereich Arbeitsmedizin
der Medizinischen Fakultät
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Arbeitsphysiologische Untersuchungen beim Einsatz digitaler Assistenz-
systeme für variantenreiche Montageprozesse in der Arbeitswelt 4.0**

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. rer. medic.

(doctor rerum medicarum)

an der Medizinischen Fakultät
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

vorgelegt von Annemarie Minow

aus Anklam

Magdeburg 2021

Bibliographische Beschreibung

Minow, Annemarie:

Arbeitsphysiologische Untersuchungen beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme für variantenreiche Montageprozesse in der Arbeitswelt 4.0.

2021. – XVI, 248 Bl., 41 Abb., 93 Tab., 23 Anl.

Kurzreferat

Digitale Assistenzsysteme finden zunehmend Eingang in Produktionsumgebungen und bei der Ausführung manueller Montagearbeiten. Die bisherigen Erkenntnisse zu den Auswirkungen derartiger Systeme auf nutzerbezogene Aspekte sind jedoch nicht ausreichend. Ziel dieser Arbeit war es, durch aufeinander aufbauende Teilstudien weitere arbeitsphysiologische Erkenntnisse zu den Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf den Menschen zu gewinnen. Diese sollen in der weiteren Entwicklung digitaler Assistenzsysteme mitberücksichtigt werden. Im Rahmen einer Vorstudie und zwei User-Tests konnten mit mehrdimensionalen arbeitswissenschaftlichen Methoden nach dem Mehrebenenansatz von Fahrberg (1969) Ergebnisse zu den Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf die psychophysiologische Beanspruchung, objektive Leistung und das Gebrauchstauglichkeitsempfinden gewonnen werden. Jedoch sind weiterhin insbesondere längsschnittliche Felduntersuchungen nötig, um einen schädigungslosen Einsatz von digitalen Assistenzsystemen zu gewährleisten.

Schlüsselwörter

Belastung, Beanspruchung, Montage, digitale Assistenzsysteme, Arbeit 4.0

Gendererklärung

Zur besseren Lesbarkeit führe ich in dieser Dissertationsschrift personenbezogene Bezeichnungen, die sich zugleich auf Frauen und Männer beziehen, nur in der gewohnten männlichen Form an, z. B. „Mitarbeiter“ statt „Mitarbeiterinnen“. Dies soll jedoch keinesfalls eine Geschlechterdiskriminierung oder eine Verletzung des Gleichheitsgrundsatzes zum Ausdruck bringen.

Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung	II
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung	3
1.2 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand.....	4
1.2.1 Digitalisierung der Arbeitswelt	4
1.2.2 Digitale Assistenzsysteme.....	8
1.2.3 Rechtliche Grundlagen	14
1.2.4 Normen, Richtlinien und Fachinformationen zur Gestaltung digitaler Assistenzsysteme	15
1.2.5 Partizipation, Nutzerakzeptanz, Usability und User Experience	20
1.2.6 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept	25
1.2.7 Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf nutzerbezogene Aspekte	28
1.3 Arbeitshypothesen	37
1.3.1 Vorstudie.....	38
1.3.2 User-Test (VR).....	39
1.3.3 User-Test (Real)	41
2 Material und Methoden.....	43
2.1 Studiendesign	43
2.2 Vorstudie.....	44
2.2.1 Probanden	44
2.2.2 Methodik	45
2.2.3 Versuchsaufbau und -ablauf.....	52
2.3 User-Test (VR).....	55
2.3.1 Probanden	55
2.3.2 Methodik	55
2.3.3 Versuchsaufbau und -ablauf.....	58
2.4 User-Test (Real)	63
2.4.1 Probanden	64
2.4.2 Methodik	64
2.4.3 Versuchsaufbau und -ablauf.....	66
2.5 Statistische Auswertung.....	71

3	Ergebnisse	73
3.1	<i>Vorstudie</i>	73
3.1.1	Soziodemografische Angaben und Statusdaten der Stichprobe.....	73
3.1.2	Objektive physiologische Beanspruchungsdaten.....	74
3.1.3	Subjektive Beanspruchungsdaten.....	78
3.1.4	Objektive Leistungsdaten.....	85
3.1.5	Usability-Daten.....	89
3.1.6	Korrelationsanalysen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg.....	90
3.2	<i>User-Test (VR)</i>	102
3.2.1	Soziodemografische Angaben und Statusdaten der Stichprobe.....	102
3.2.2	Objektive physiologische Beanspruchungsdaten.....	103
3.2.3	Subjektive Beanspruchungsdaten.....	111
3.2.4	Objektive Leistungsdaten.....	119
3.2.5	Usability-Daten.....	122
3.2.6	Korrelationsanalysen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg.....	128
3.3	<i>User-Test (Real)</i>	145
3.3.1	Soziodemografische Angaben und Statusdaten der Stichprobe.....	145
3.3.2	Objektive physiologische Beanspruchungsdaten.....	146
3.3.3	Subjektive Beanspruchungsdaten.....	147
3.3.4	Objektive Leistungsdaten.....	147
3.3.5	Usability-Daten.....	148
3.3.6	Korrelationsanalysen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg.....	152
4	Diskussion	153
4.1	<i>Reflexion der Arbeitshypothesen</i>	153
4.1.1	Vorstudie.....	153
4.1.2	User-Test (VR).....	165
4.1.3	User-Test (Real).....	178
4.2	<i>Limitationen der Studien</i>	183
4.3	<i>Schlussfolgerungen und Ausblick (für die Praxis)</i>	186
5	Zusammenfassung	188
	Literaturverzeichnis	190
	Danksagung	204
	Eidesstattliche Erklärung	205
	Darstellung des Bildungsweges	206
	Publikationsverzeichnis	208

Anlagen	214
A1: <i>Auswahl der Suchstringkomponenten zu nutzerbezogenen Aspekten beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme.....</i>	214
A2: <i>Votum der Ethikkommission.....</i>	215
A3: <i>Probandenaushang zur Vorstudie.....</i>	216
A4: <i>Probandeninformation zur Vorstudie.....</i>	217
A5: <i>Einwilligungserklärung zur Studienteilnahme.....</i>	218
A6: <i>Vorstudie: Soziodemografische Angaben und Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen.....</i>	219
A7: <i>Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ).....</i>	221
A8: <i>Eigenzustandsskala (EZ-Skala).....</i>	222
A9: <i>Instruktion des TAP-Tests (Augenbewegung).....</i>	223
A10: <i>Fragebogen zum NASA-TLX.....</i>	224
A11: <i>Fragebogen zur SUS (Vorstudie).....</i>	227
A12: <i>Probandenaushang zum User-Test (VR).....</i>	228
A13: <i>Probandeninformation zum User-Test (VR).....</i>	229
A14: <i>User-Test (VR und Real): Soziodemografische Angaben und Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen.....</i>	230
A15: <i>Kurzpräsentation zur VR-Handhabung im User-Test.....</i>	232
A16: <i>Geometrische Figuren aus User-Test (VR).....</i>	235
A17: <i>Schrittweiser Zusammenbau des Wegeventils (User-Test VR).....</i>	236
A18: <i>Fragebogen zur Rating Scale Mental Effort (RSME).....</i>	240
A19: <i>Fragebogen zur SUS (User-Test VR).....</i>	241
A20: <i>Fragebogen zum Technology Acceptance Model (TAM) – ausgewählte Skalen.....</i>	242
A21: <i>ISONORM-Fragebogen (short).....</i>	243
A22: <i>Probandeninformation zum User-Test (Real).....</i>	246
A23: <i>Interviewleitfaden zum User-Test (Real).....</i>	248

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemarchitektur 3D-Montageassistent (mod. nach Stüring 2016)	3
Abbildung 2: Auflösungstendenzen (mod. nach Sonntag 2016)	6
Abbildung 3: Chancen und Risiken digitaler Assistenzsysteme (mod. nach Böckelmann & Minow 2018)	9
Abbildung 4: Klassifikationssystem digitaler Assistenzsysteme hinsichtlich Technologieart (mod. nach Kasselmann & Willeke 2016)	10
Abbildung 5: Klassifikationssystem digitaler Assistenzsysteme hinsichtlich Grad, Art und Zielsetzung der Unterstützung (mod. nach Apt et al. 2018)	11
Abbildung 6: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (mod. nach Milgram et al. 1995; Milgram & Colquhoun 1999)	12
Abbildung 7: Spannungsfelder digitaler Assistenzsysteme (mod. nach Hasselmann et al. 2018) ..	13
Abbildung 8: Systematik des Arbeitsschutzrechts (Rundnagel 2017)	14
Abbildung 9: Aufbau der DIN EN ISO 9241 mit ausgewählten Normteilen	16
Abbildung 10: Interaktionsprinzipien (mod. nach DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020c)	17
Abbildung 11: Humanzentrierter Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (mod. nach DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020b)	19
Abbildung 12: Technologie-Akzeptanz-Modell (mod. nach Venkatesh & Davis 1996)	21
Abbildung 13: Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (mod. nach Venkatesh et al. 2003)	22
Abbildung 14: Dynamisches Akzeptanzmodell (mod. nach Kollmann 1988)	23
Abbildung 15: Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (mod. nach Rohmert & Rutenfranz 1983; Scheuch & Schröder 1990; Scheuch 2011)	27
Abbildung 16: Design der Gesamtstudie	43
Abbildung 17: Psychophysiologisches Mehrebenenkonzept (mod. nach Fahrenberg 1969)	44
Abbildung 18: Einflussfaktoren auf die Herzratenvariabilität (mod. nach Sammito et al. 2015; Sammito & Böckelmann 2016; Sammito et al. 2016)	46
Abbildung 19: Eigenzustandsskala (mod. nach Nitsch 1976)	49
Abbildung 20: Interpretation der System Usability Scale (Bangor et al. 2009)	51
Abbildung 21: Ablauf der Vorstudie	53
Abbildung 22: Probandin in der Vorstudie bei der Arbeit mit der Papierliste (Foto: Annemarie Minow)	54
Abbildung 23: Proband in der Vorstudie bei der Arbeit mit der digitalen Liste (Foto: Annemarie Minow)	54
Abbildung 24: Ablauf des User-Tests (VR)	59
Abbildung 25: Virtueller Arbeitsplatz mit Assistenzsystemen im virtuellen User-Test	60
Abbildung 26: Ansicht des VR-Raums bei Ruhephase im Stehen mit VR-Brille	61
Abbildung 27: Unabhängiges Trainingsszenario zur Übung der VR-Handhabung	61
Abbildung 28: Zwei Probanden mit VR-Brille im virtuellen User-Test (Foto: Annemarie Minow)	62
Abbildung 29: Simulation im User-Test (VR) – Pick-to-Light-System	62
Abbildung 30: Simulation im User-Test (VR) – AR-Konturen im Vordergrund und Display im Hintergrund	63

Abbildung 31: Ablauf des User-Tests (Real).....	67
Abbildung 32: Arbeitsplatz mit Assistenzsystem für realen User-Test (Foto: Matthias Hauptvogel)	68
Abbildung 33: Linker Bildschirm des Montageassistenten im realen User-Test.....	68
Abbildung 34: Rechter Bildschirm des Montageassistenten im realen User-Test.....	69
Abbildung 35: Screenshot aus dem Trainingsvideo (Fernansicht)	70
Abbildung 36: Screenshot aus dem Trainingsvideo (Nahansicht)	70
Abbildung 37: Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen (Vorstudie)	73
Abbildung 38: Favorisierte Hilfestellung (Vorstudie)	89
Abbildung 39: Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen (User-Test VR).....	102
Abbildung 40: Favorisiertes Assistenzsystem (User-Test VR)	122
Abbildung 41: Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen (User-Test Real)	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikationssystem digitaler Assistenzsysteme hinsichtlich Unterstützungsbereich und Anwendungsmobilität (mod. nach Merkel et al. 2016)	10
Tabelle 2: Organ- bzw. Funktionsbeanspruchungen bei verschiedenen Arbeitsformen mit Einordnung der Assistenzsysteme in diese Klassifikation (mod. nach Rohmert & Rutenfranz 1983; Böckelmann & Minow 2018).....	11
Tabelle 3: Benutzertypen des allgemeinen Akzeptanzmodells (mod. nach Müller-Böling & Müller 1986).....	23
Tabelle 4: Studienübersicht zu den Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf nutzerbezogene Aspekte	30
Tabelle 5: Arbeitshypothesen der Vorstudie	38
Tabelle 6: Arbeitshypothesen des User-Tests (VR).....	40
Tabelle 7: Arbeitshypothesen des User-Tests (Real)	42
Tabelle 8: Auswertungsphasen für die HRV-Analyse der Vorstudie.....	46
Tabelle 9: Auswertungsphasen für die HRV-Analyse des User-Tests (VR)	56
Tabelle 10: Auswertungsphasen für die HRV-Analyse des User-Tests (Real).....	64
Tabelle 11: Legende zu Korrelationstabellen	72
Tabelle 12: HRV-Parameter bei der Papierliste und bei der digitalen Liste.....	74
Tabelle 13: HRV-Parameter bei der Ruhephase, der Papierliste und der digitalen Liste.....	75
Tabelle 14: Prozentuale Veränderung der HRV-Parameter für die Papierliste und die digitale Liste.....	76
Tabelle 15: HRV-Parameter bei dem ersten und zweiten Durchlauf	77
Tabelle 16: HRV-Parameter bei der Ruhephase und dem ersten und zweiten Durchlauf	77
Tabelle 17: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die HRV-Daten mittels LGM... ..	78
Tabelle 18: VFQ-Beschwerden vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste.....	79
Tabelle 19: VFQ-Beschwerden vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf	80
Tabelle 20: Prozentuale Veränderung der VFQ-Beschwerden für die Papierliste und die digitale Liste.....	81
Tabelle 21: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die VFQ-Beschwerden mittels LGM	81
Tabelle 22: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste	82
Tabelle 23: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf	83
Tabelle 24: Prozentuale Veränderung der Binärfaktoren der EZ-Skala für die Papierliste und die digitale Liste.....	83
Tabelle 25: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die subjektiven Motivations- und Beanspruchungslage mittels LGM	84
Tabelle 26: Reaktionszeiten vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste	85
Tabelle 27: Fehleranzahl, Auslassungen, Ausreißer vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste	86
Tabelle 28: Veränderung der objektiven Leistungsdaten für die Papierliste und die digitale Liste.. ..	87
Tabelle 29: Reaktionszeiten vorher, bei dem ersten und bei dem zweiten Durchlauf	87
Tabelle 30: Fehleranzahl, Auslassungen, Ausreißer vorher, bei dem ersten und bei dem zweiten Durchlauf.....	88

Tabelle 31: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die objektiven Leistungsdaten mittels LGM	89
Tabelle 32: Korrelationen für die Papierliste (HRV vs. objektive Leistungsdaten in TAP, VFQ, EZ-Skala, NASA-TLX und SUS)	92
Tabelle 33: Korrelationen für die digitale Liste (HRV vs. objektive Leistungsdaten in TAP, VFQ, EZ-Skala, NASA-TLX und SUS)	94
Tabelle 34: Korrelationen für die Papierliste (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten in TAP)	97
Tabelle 35: Korrelationen für die digitale Liste (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten in TAP)	98
Tabelle 36: Korrelationen für die Papierliste (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und Usability).....	99
Tabelle 37: Korrelationen für die digitale Liste (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und Usability).....	99
Tabelle 38: Korrelationen für die digitale Liste (Objektive Leistungsdaten in TAP und Usability) ...	99
Tabelle 39: Korrelationen für die Papierliste (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)	100
Tabelle 40: Korrelationen für die digitale Liste (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)	101
Tabelle 41: HRV-Parameter bei dem Wegeventil vor dem Puzzle mit AR-Konturen und Pick-to-Light	103
Tabelle 42: HRV-Parameter bei dem Wegeventil nach dem Puzzle mit AR-Konturen und Pick-to-Light	103
Tabelle 43: HRV-Parameter bei dem Wegeventil vor und nach dem Puzzle mit AR-Konturen	104
Tabelle 44: HRV-Parameter bei dem Wegeventil vor und nach dem Puzzle mit Pick-to-Light	104
Tabelle 45: HRV-Parameter bei den AR-Konturen und dem Pick-to-Light-System.....	105
Tabelle 46: HRV-Parameter bei dem ersten und zweiten Durchlauf	105
Tabelle 47: HRV-Parameter bei den drei Ruhephasen	107
Tabelle 48: HRV-Parameter bei der Ruhephase, den AR-Konturen und dem Pick-to-Light	108
Tabelle 49: HRV-Parameter bei der Ruhephase und dem ersten und zweiten Durchlauf	109
Tabelle 50: Prozentuale Veränderung der HRV-Parameter für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System	109
Tabelle 51: HRV-Parameter bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe	110
Tabelle 52: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die HRV-Daten mittels LGM	111
Tabelle 53: VFQ-Beschwerden vorher, bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light	112
Tabelle 54: VFQ-Beschwerden vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf	113
Tabelle 55: Prozentuale Veränderung der VFQ-Beschwerden für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System	114
Tabelle 56: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die VFQ-Beschwerden mittels LGM	114
Tabelle 57: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System	115
Tabelle 58: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf	116

Tabelle 59: Prozentuale Veränderung der Binärfaktoren der EZ-Skala für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System	116
Tabelle 60: Binärfaktoren der EZ-Skala bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe	117
Tabelle 61: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die Motivations- und Beanspruchungslage mittels LGM	118
Tabelle 62: RSME bei den Assistenzfunktionen und bei den Durchläufen	119
Tabelle 63: RSME bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.....	119
Tabelle 64: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die subjektive Beanspruchung mittels LGM	119
Tabelle 65: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil vor dem Puzzle mit den AR-Konturen und mit dem Pick-to-Light-System	120
Tabelle 66: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil nach dem Puzzle mit den AR-Konturen und mit dem Pick-to-Light-System	120
Tabelle 67: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil im zeitlichen Verlauf	120
Tabelle 68: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil vor dem Puzzle bei der Trainingsfilm-Gruppe und bei der Desktoptraining-Gruppe	121
Tabelle 69: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil nach dem Puzzle bei der Trainingsfilm-Gruppe und bei der Desktoptraining-Gruppe	121
Tabelle 70: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die objektiven Leistungsdaten mittels LGM.....	121
Tabelle 71: SUS bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.....	123
Tabelle 72: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die Usability mittels LGM	123
Tabelle 73: TAM bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System	123
Tabelle 74: TAM bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe	124
Tabelle 75: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die wahrgenommene Nützlichkeit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit mittels LGM.....	125
Tabelle 76: ISONORM bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System	126
Tabelle 77: ISONORM-Mittelwerte bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System.....	127
Tabelle 78: ISONORM-Mittelwerte bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe	127
Tabelle 79: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die Grundsätze der Dialoggestaltung mittels LGM	127
Tabelle 80: Korrelationen für die AR-Konturen (HRV vs. objektive Leistungsdaten, VFQ, EZ-Skala, RSME, Usability / Nutzerakzeptanz)	130
Tabelle 81: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (HRV vs. objektive Leistungsdaten, VFQ, EZ-Skala, RSME, Usability / Nutzerakzeptanz).....	133
Tabelle 82: Korrelationen für die AR-Konturen (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten)	136
Tabelle 83: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten)	137
Tabelle 84: Korrelationen für die AR-Konturen (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und Usability / Nutzerakzeptanz)	138
Tabelle 85: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und Usability / Nutzerakzeptanz)	139

Tabelle 86: Korrelationen für die AR-Konturen (Objektive Leistungsdaten und Usability / Nutzerakzeptanz)	141
Tabelle 87: Korrelationen für die AR-Konturen (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)	142
Tabelle 88: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)	143
Tabelle 89: Korrelationen für die AR-Konturen (Fragebögen zur Usability / Nutzerakzeptanz)	144
Tabelle 90: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Fragebögen zur Usability / Nutzerakzeptanz)	144
Tabelle 91: HRV-Parameter bei der Ruhephase und der Montage	146
Tabelle 92: HRV-Parameter bei der Montage bei dem realen und virtuellen User-Test	147
Tabelle 93: RSME bei dem realen und virtuellen User-Test	147

Abkürzungsverzeichnis

A gereiz brenn	Augen sind gereizt oder brennen
AKT	Aktivierung (Initiative)
ANBE	Anstrengungsbereitschaft
AR	Augmented Reality
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
ASiG	Arbeitssicherheitsgesetz
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
AU	Arbeitsunfähigkeit
AWE	Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse
BEA	Beanspruchung (Handlungsfähigkeit)
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BildscharbV	Bildschirmarbeitsverordnung
CAD	Computer-Aided Design
cc	Cum correctione (mit Korrektur)
DEF	Defizienz (Ermüdung)
DFA1	Detrended fluctuations; Grad der Zufälligkeit/Korrelation; reicht von 0,5 (zufällig) bis 1,5 (korreliert) mit Normalwerten um 1,0; wird häufig als nicht-linearer Parameter für kurze NN-Intervall-Daten genutzt, kurzfristige Fluktuationsneigung
DFA2	Detrended fluctuations; wird häufig als nicht-linearer Parameter für NN-Intervalle längerer Aufzeichnungsdauer genutzt, reduzierte Werte sind assoziiert mit einer schlechten Prognose, langfristige Fluktuationsneigung
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
Doppels	Doppelsehen
EEG	Elektroenzephalogramm
EFF	Effizienz (Selbstgefühl)
EKG	Elektrokardiogramm
EN	Europäische Norm
ERH	Erholtheit
EZ-Skala	Eigenzustandsskala
Fraunhofer IFF	Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung
Fraunhofer IOF	Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik
G Ermüd	Geistige Ermüdung
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
HF [%]	Prozentualer High Frequency-Anteil am Gesamtspektrum
HF [ms ²]	High Frequency Power: Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,15 bis 0,40 Hz
HF nu	High Frequency normalized unit: entspricht HF/(TP - VLF) x 100
HF-Peak [Hz]	High Frequency Peak: Frequenzgipfel im HF-Band; Respiratorischer Peak

HMD	Head-Mounted-Display
HRV	Herzratenvariabilität
HUD	Head-up-Display
IAM	Bereich Arbeitsmedizin
ISO	Internationale Organisation für Normung
KON	Kontaktbereitschaft
Kopfschm	Kopfschmerzen
LF [%]	Prozentualer Low Frequency-Anteil am Gesamtspektrum
LF [ms ²]	Low Frequency Power: Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,04 bis 0,15 Hz
LF nu	Low Frequency normalized unit: entspricht $LF/(TP - VLF) \times 100$
LF/HF	Verhältnis des LF-Bands zum HF-Band
LF-Peak [Hz]	Low Frequency Peak: Frequenzgipfel im LF-Band; Baroreflex-Peak
LGM	Linear gemischte Modelle
LV	Landesverordnung
Max	Maximalwert
MD	Median
Mean HR [1/min]	Mittelwert der Herzschlagfrequenz
Mean NN [ms]	Mittelwert der NN-Intervalle
Min	Minimalwert
MOT	Motivation (Handlungsbereitschaft)
MW	Arithmetisches Mittel
Nackenschm	Nackenschmerzen
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index
NFC	Near Field Communication
NN 50 [count]	Anzahl der aufeinanderfolgenden NN-Intervallpaare, die sich > 50 ms voneinander unterscheiden
NN tri index	Triangular Index; Integral der Dichteverteilung (Anzahl aller NN-Intervalle dividiert durch das Maximum (Höhe) der Dichteverteilung) bzw. Quotient aus der absoluten Anzahl der NN-Intervalle zur Anzahl der modalen NN-Intervalle
OST	Optical-See-Through
OvGU	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Parker	Parker Hannifin Manufacturing GmbH & Co. KG, Hydraulic Controls Division Europe
pNN 50 [%]	Prozentsatz aufeinander folgender NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen
PSSUQ	Post Study System Usability Questionnaire
PtL	Pick-to-Light
QUIS	Questionnaire for User Interaction Satisfaction
RFID	Radio-Frequency Identification

RMSSD [ms]	Root Mean Square of Successive Differences: Quadratwurzel des Mittelwertes der Summe aller Differenzen zwischen benachbarten NN-Abständen
RSME	Rating Scale Mental Effort
SCHL	Schläfrigkeit
Schm A	Schmerzen in oder um die Augen
Schw Linien verf	Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können
Schw scharf sehen	Schwierigkeiten scharf zu sehen
Schwere A	Schwere Augen
SD	Standardabweichung
SD HR [1/min]	Standardabweichung der Herzschlagfrequenz
SD1 [ms]	Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser
SD2 [ms]	Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser
SDNN [ms]	Standardabweichung der NN-Intervalle
SICH	Selbstsicherheit
SOZ	Soziale Anerkennung
SPAN	Spannungslage
Spring Text	Springender Text
STIM	Stimmungslage
SUMI	Software Usability Measurement Inventory
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TAP	Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung
TEN	Tension (emotionale Spannung)
TINN [ms]	Grundlinienbreite des NN-Intervall-Histogramms
TP [ms ²]	Total Power: Gesamtleistung oder Gesamtspektrum; entspricht Energiedichte im Spektrum von 0,00001 bis 0,4 Hz
Trän A	Tränende Augen
TRBA	Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
Trock A	Trockene Augen
TV	Tarifverträge
UAT	User Acceptance Test
Übelk	Übelkeit
UTAUT	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
UVT	Unfallversicherungsträger
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
Verschw Sicht	Verschwommene Sicht
VFQ	Visual Fatigue Questionnaire

VLf [ms ²]	Very Low Frequency Power: Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,003 bis 0,04 Hz
VLf-Peak [Hz]	Very Low Frequency Peak: Frequenzgipfel im VLf-Band
VR	Virtual Reality
WV nP	Wegeventil nach dem Puzzle
WV vP	Wegeventil vor dem Puzzle
ZBS	Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.

1 Einführung

Digitalisierung und ihre Assistenzsysteme sind aus dem Alltag kaum noch wegzudenken. Wir fragen den Sprachassistenten des Smartphones nach dem Wetter, lassen uns vom Smart Home unsere Lieblingsplaylist abspielen, erledigen unsere Bankgeschäfte mobil und shoppen beim Online-Händler. Wir nutzen verschiedenste digitale Apps, die uns helfen einen Stau zu umfahren, über das aktuelle Tagesgeschehen informiert zu bleiben und Kontakt zu Freunden und Familie – auch in der Covid-19-Pandemie – zu halten. Soziale Medien, mobile Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Geräte mit künstlicher Intelligenz und Fahrerassistenzsysteme beim Auto ziehen uns zunehmend in ihren Bann und verändern unsere Gewohnheiten.

Dieser Trend zu digitalen Assistenzsystemen zeigt sich nicht nur im Freizeit-, sondern auch im Arbeitsbereich. Doch woher stammen diese Entwicklungen?

Die heutige Arbeitswelt und Gesellschaft sind von vielfältigen Veränderungen und Herausforderungen wie Globalisierung und Flexibilisierung geprägt (Arlinghaus & Antons 2020). Industrielle Produktionsprozesse werden durch spezielle Kundenwünsche nach individuellen Produktvarianten immer komplexer und vielfältiger und sind aufgrund ihrer parallel zu erfüllenden Erfordernisse häufig nur durch eine teilautomatisierte oder manuelle Montage sowie individuelle Lösungen umsetzbar. Dabei stellen die Variantenvielfalt und Komplexität der Arbeitsprozesse sowie die Produktqualität hohe Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Mitarbeitern in der Handmontage. Die Arbeitsanweisungen in der manuellen Montage werden bisher meist in Papierform bereitgestellt. Papiergebundene Anweisungen sind aufgrund der vielen Produktvarianten jedoch zunehmend ineffektiv und zu unflexibel (Bannat 2014). Digitale Assistenztechnologien bieten in der manuellen Montage, aber auch in anderen Bereichen wie Kommissionierung und Intralogistik vielversprechende Möglichkeiten, den aktuellen Herausforderungen in der industriellen Arbeitswelt zu begegnen. Sie bergen jedoch Risiken, die es gerade im Kontext der Gesundheit und Arbeitssicherheit der Beschäftigten zu beachten gilt.

Ebenso wird das Arbeitskräftepotenzial Deutschlands durch eine schrumpfende und strukturell alternde Bevölkerung beeinflusst, in der der Anteil älterer Beschäftigter im Arbeitsprozess steigt. Vor diesem Hintergrund erscheint die Anpassung und Neugestaltung bestehender Arbeitsplätze und Fertigungstechnologien nötig, um die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland zu sichern.

Die Veränderungen und Trends der Arbeitswelt 4.0 (z. B. Digitalisierung, Globalisierung, demografischer Wandel, Migration) stellen nicht nur Ingenieure und Informatiker, sondern auch

Arbeitsmediziner, -physiologen und -psychologen in diesem Zusammenhang vor die Herausforderung, Mensch und Maschine hinsichtlich Gesundheit, Arbeitsorganisation und Ergonomie optimal aufeinander abzustimmen (Böckelmann 2018). Dies ist unabdingbar, da sichere und gesunde Arbeitsbedingungen die Basis für einen sozialen Fortschritt der Gesellschaft und eine wettbewerbsfähige Wirtschaft bilden.

Maßgeblich werden die Veränderungsprozesse der vierten industriellen Revolution durch die digitale Transformation vorangetrieben und von ihr beeinflusst. Die Digitalisierung verändert die Arbeitsbedingungen, -organisation sowie -formen (z. B. Mobil-flexible Arbeit, Homeoffice, Telearbeit, Co-Working, Space-Office) exponentiell. Sie entgrenzt, automatisiert, intensiviert, flexibilisiert und beschleunigt.

Entstehende Risiken, neue Belastungen und Gefährdungen im Rahmen von Arbeit 4.0, können eine erhöhte Beanspruchung der Arbeitsperson bedeuten. Zwar beschäftigten sich immer mehr Forschungsprojekte der letzten Jahre mit der Entwicklung und dem Einsatz von digitalen Assistenztechnologien und strebten dabei eine humanzentrierte Sichtweise an, z. B. das BMBF-geförderte Projekt AVILUS¹, welches als Folgeprojekt der Vorhaben ARVIKA² und AR-TESAS³ fungierte und eine nutzer- und anwendungsorientierte Forschung, Entwicklung und Evaluation virtueller und augmentierter Technologien zum Ziel hatte (Schreiber & Zimmermann 2011), jedoch ist die Frage nach den gesundheitlichen Auswirkungen digitaler Assistenztechnologien auf den Menschen bisher nicht abschließend geklärt.

Im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ und der Innovationsallianz 3Dsensation startete im April 2017 das Verbundvorhaben „3D-basierte Assistenztechnologien für variantenreiche Montageprozesse – Menschzentrierter Arbeitsplatz der Zukunft („3D-Montageassistent“)" mit dem Teilvorhaben „Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenten“ (Förderkennzeichen: 03ZZ0441E). Die beteiligten Partner sind:

- LIVINGSOLIDS GmbH
- Piezosysteme Jena GmbH
- Parker Hannifin Manufacturing GmbH & Co. KG, Hydraulic Controls Division Europe (Parker)
- Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. (ZBS)

¹ AVILUS (Angewandte Virtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittel Lebenszyklus) von 2008 - 2011

² ARVIKA (Augmented Reality zur Unterstützung von Arbeitsprozessen in Entwicklung, Produktion und Service) von 1999 - 2003

³ ARTESAS (Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications) von 2004 - 2006

- Bereich Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (IAM)
- Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)
- Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF)

Die Aktivitäten und Erkenntnisse aus dem beschriebenen Teilvorhaben bilden die Grundlage und den Rahmen für die vorliegende Dissertation.

1.1 Zielsetzung

Die Ziele im Verbundvorhaben „3D-Montageassistent“ sind die Erforschung und Entwicklung funktioneller Module für die Realisierung von 3D-basierten Assistenzsystemen zur technischen Unterstützung manueller Fertigungsprozesse in der Montage. Eine echtzeitfähige und latenzarme 3D-Erfassung des Montageszenarios soll den Arbeitsverlauf, das Arbeitsergebnis und seine Qualität stetig überprüfen, die Intention und den Beanspruchungsgrad der Arbeitsperson erkennen und darauf aufbauend gegebenenfalls Unterstützungsmöglichkeiten anbieten (Stüring 2016). Die geplante Systemarchitektur des 3D-Montageassistenten findet sich in Abbildung 1.



Abbildung 1: Systemarchitektur 3D-Montageassistent (mod. nach Stüring 2016)

Die Ziele des Teilvorhabens „Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz“ (Böckelmann 2016) stellen sich wie folgt dar:

- Analyse der Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit des Nutzers bei der Anwendung des Assistenzsystems in der Montage,
- Beurteilung der dabei entstehenden Belastungen und daraus resultierenden Beanspruchungen und
- Erfassung der Akzeptanz der Assistenztechnologie beim Nutzer.

Im Fokus der arbeitsmedizinischen Begleituntersuchung stehen die vergleichende Durchführung und Auswertung von physischen und psychischen Belastungen und Beanspruchungen bei Montageprozessen mit und ohne 3D-basierter Assistenztechnologie sowie die Erarbeitung einer ergonomie- und belastungsoptimierten Gestaltungsempfehlung zukünftiger Montagearbeitsplätze (Böckelmann 2016).

Aus den Zielen des Verbundvorhabens und des Teilvorhabens resultieren folgende globale Fragestellungen für die vorliegende Promotionsarbeit, die dann detaillierter in dem Unterkapitel 1.3 für jede einzelne Studie formuliert werden:

- Wie wirkt sich der Einsatz digitaler Assistenzsysteme bei manuellen Montageprozessen auf die psychophysiologische Beanspruchung der Nutzer aus?
- Wie wirkt sich der Einsatz digitaler Assistenzsysteme bei manuellen Montageprozessen auf die objektive Leistung der Nutzer aus?
- Wie stellen sich Usability (dt. Gebrauchstauglichkeit) und Nutzerakzeptanz beim Einsatz neuer digitaler Assistenzsysteme für manuelle Montage Tätigkeiten dar?
- Existieren Zusammenhänge zwischen den Outcome-Parametern psychophysiologische Beanspruchung, objektive Leistung und Usability?

1.2 *Theoretische Grundlagen und Forschungsstand*

In den folgenden Abschnitten werden die theoretischen Grundlagen und der Forschungsstand zu den oben genannten Fragestellungen erläutert.

1.2.1 *Digitalisierung der Arbeitswelt*

Digitalisierung bezeichnet den Prozess, Daten und Vorgänge in einer Art und Weise zu erzeugen, umzuwandeln und darzustellen, dass sie informationstechnisch mithilfe eines Computers gespeichert, verarbeitet und genutzt werden können (Wolf & Strohschen 2018). Es ist allgegenwärtig, dass die Digitalisierung der Gesellschaft und Arbeitswelt rasch voranschreitet. Sie stellt damit einen, wenn nicht sogar den wichtigsten, Innovations- und Wachstumstreiber unserer heutigen Zeit dar. Mensch und cyber-physikalische Systeme teilen sich zunehmend die digitale Arbeitswelt. Dabei wirkt Digitalisierung auf den Menschen häufig faszinierend und bedrohlich zugleich. Beide Wahrnehmungen sind nachvollziehbar und ergeben sich aus tatsächlich vorhandenen Chancen, Risiken und Spannungsfeldern, die durch Digitalisierungsprozesse entstehen.

Leso et al. (2018) geben in ihrem Review eine Übersicht über Möglichkeiten und damit einhergehende Probleme von Industrie 4.0. Durch die Automatisierung und Digitalisierung werde die

Arbeit flexibler, sicherer, inklusiver und weniger monoton. Damit würden Fähigkeiten wie Entscheidungen selbstständig zu fällen, Arbeit einteilen zu können, um eine gesunde Life-Work-Balance zu behalten und sich ständig weiter zu entwickeln, zunehmend wichtiger, um mit der Entwicklung der Digitalisierung Schritt halten zu können. Mit Arbeit 4.0 könne dadurch die mentale Arbeitsbelastung und die Komplexität der Aufgaben ansteigen. Darin läge die Gefahr, dass Mitarbeiter einer höheren psychischen Belastung ausgesetzt sind, es für ältere Menschen schwierig sein könnte, mit sich verändernden digitalen Systemen umzugehen und die Effektivität eines jeden Arbeiters verfolgt werden kann, wodurch noch mehr Druck für den Einzelnen entsteht. Um dies zu vermeiden und der neuen Problematik einen adäquaten Wert beizumessen, sollte es ein Risikomanagement geben, in dem schon beim Design der Assistenzsysteme die möglichen Anwender integriert werden.

Eine Digitalisierung bringt die Verfügbarkeit von Informationen in Echtzeit mit sich, die es ermöglicht Menschen und technische Systeme miteinander zu vernetzen. Sie entgrenzt, intensiviert und verdichtet jedoch auch die Arbeitsprozesse (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2016). Arbeitsabläufe werden durch die steigende Informationsmenge und höhere Kommunikationsanforderungen zunehmend komplexer. Es gibt steigende Anforderungen an Flexibilität, Teamfähigkeit und Selbstorganisation.

Übergeordnet zu den direkten betrieblichen Innovationen werden weitere gesellschaftliche Veränderungen deutlich.

Dass Digitalisierung von Arbeitnehmern vermehrt als Bedrohung wahrgenommen wird, hängt auch mit der Angst zusammen, dass Maschinen und Roboter menschliche Arbeitsplätze und ihre Tätigkeiten übernehmen und den Mitarbeiter ersetzen könnten. Auch die Studie von Frey & Osborne (2013) mit der Einschätzung, dass 47 % aller Arbeitsplätze in den USA bis 2035 durch Automatisierung und Digitalisierung wegfallen könnten, trug zu dieser Verunsicherung der Beschäftigten bei. Bezogen auf den deutschen Arbeitsmarkt zeigt sich, dass 42 % der Arbeitsplätze einen hohen Automatisierungsgrad besitzen und dadurch potenziell gefährdet sind (Bonin et al. 2015). Andere Studien beschreiben jedoch, dass es weniger zu einem generellen Abbau von Stellen, sondern eher zur Wandlung von Berufsbildern und -feldern und einem Umbau von Stellen kommt (Wolter et al. 2015). Experten sehen eine Entwicklung zu polarisierenden Berufsbildern, bei denen einerseits Hochqualifizierte Tätigkeiten des abstrakten Denkens und Handelns ausführen und andererseits niedrig qualifizierte Mitarbeiter manuelle, nicht routinierbare bzw. nicht automatisierbare Tätigkeiten verrichten (Schweighofer 2016; Apt et al. 2018). Bezogen auf den Wandel der Qualifikationsanforderungen wird es zur essenziellen Notwendigkeit, dass die Kompetenzen von Beschäftigten weiterentwickelt und gefördert werden, damit Mitarbeiter in der Lage sind, neue Technologien sinnvoll zu nutzen. Ziel

sollte sein und ist sicher, dass der Mensch „sowohl die *gestaltende und entscheidende Autorität als auch der Erfahrungsträger bleibt, während seine Rolle im Arbeitsprozess durch smarte Werkzeuge und Assistenzsysteme aufgewertet wird. Perspektivisch könnte die Trennung von Steuerung und Ausführung überwunden und durch eine lockere Vernetzung hochqualifizierter und gleichberechtigt agierender Beschäftigter ersetzt werden*“ (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2016, S. 72-73).

Die Digitalisierung bringt zudem Auflösungstendenzen und Entgrenzung in Raum, Zeit und Struktur mit sich (vgl. Abbildung 2).

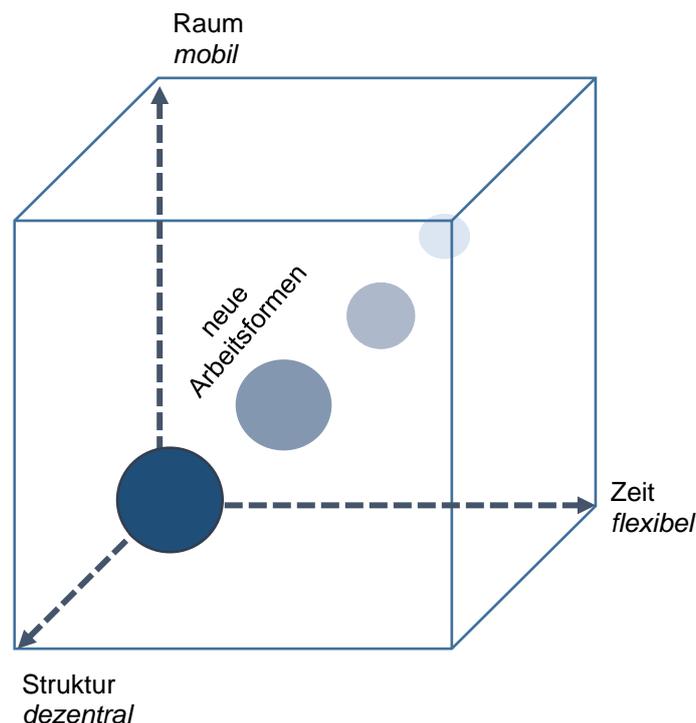


Abbildung 2: Auflösungstendenzen (mod. nach Sonntag 2016)

„Klassische“ Arbeitsformen sind geprägt von hierarchischen Organisationen mit starren Abteilungsstrukturen. Hier wird Arbeitsleistung stärker kontrolliert und an Zeiterfordernis gemessen und die Trennung von Arbeit und Freizeit wird deutlich. Je heller die Kreise in Abbildung 2 werden, desto mobiler, dezentraler und flexibler können die Arbeitsformen beschrieben werden. Es gibt die Tendenz zu heterarchischen Organisationen mit heterogenen Teams, die zunehmend in eigenverantwortlicher Projektarbeit organisiert sind. Die Arbeitsleistung wird in einem solchen Modell stärker am Endergebnis gemessen. Zudem ist eine Vermischung von Arbeit- und Freizeitbereich zu beobachten. Wichtig ist hier nicht nur die Extreme zu beachten, sondern auch die Zwischenformen „alter“ und „neuer“ Arbeitsformen (Sonntag 2016).

Die Entgrenzung zeigt sich u. a. durch eine zunehmende arbeitsbezogene erweiterte Erreichbarkeit über verschiedene Branchen und Berufsgruppen hinweg (Strobel 2013; Hassler et al.

2016; Pangert et al. 2016; Minow 2017; Minow & Swart 2019). Z. B. Homeoffice, in der Covid-19-Pandemie relevanter denn je, ist eine neue Arbeitsform der räumlichen Flexibilisierung, die jedoch nicht immer problemlos umgesetzt werden kann. Neben ergonomischen Anforderungen, die auch zuhause oder z. B. im Zug zu beachten sind, kann die Benachteiligung von Mitarbeitern thematisiert werden, die nicht (problemlos) im Homeoffice arbeiten können (z. B. Montagemitarbeiter, Pflegekräfte, Lokführer usw.). Neiddebatten werden hier nicht nur branchenübergreifend, sondern auch unternehmensintern geführt.

Die digitalisierte Arbeit 4.0 wird häufig als stärker selbstbestimmt beschrieben als vergangene Arbeitswelten und fördert damit Handlungs- und Entscheidungsspielräume als Dimension guter Arbeitsgestaltung (Nahles & Hofmann 2017). Zunehmend bieten technische Systeme die Möglichkeit, Prozesse zu automatisieren und Entscheidungen abzunehmen. Diese Tendenz kann eine Entlastung, jedoch auch eine zusätzliche Belastung für den Anwender bedeuten, der *„im Extremfall nur noch ausführend auf Anweisungen des technischen Systems in genau vorgegebenen Arbeitsschritten und Arbeitstakten reagieren [muss]“* (Nahles & Hofmann 2017, S. 8). Ergänzend ist der Umgang mit Informationen, insbesondere eine Fülle oder gar Überflutung mit Informationen, zu diskutieren. Die modernen Kommunikationsmittel (z. B. E-Mails, Messengerdienste) ermöglichen die blitzschnelle Weitergabe von Informationen an einen großen Personenkreis. Doch nicht nur die Quantität, auch die Qualität der Informationen hat Einfluss auf das Beanspruchungs- und Stresserleben, die Konzentrationsfähigkeit und Gesundheit der betreffenden Personen (Drössler et al. 2018; Seidler et al. 2018). Junghanns & Kersten (2020) konnten in einer Stichprobe von über 20.000 Erwerbstätigen bei zunehmender, erlebter Informationsüberflutung einen Anstieg der Beschwerdeprävalenz nachweisen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht möglich alle Trends der Digitalisierung ausführlich zu beschreiben. Zusammenfassend bietet Digitalisierung jedoch große Potenziale. *„Wie gut die Potenziale der Digitalisierung für die Gestaltung von Arbeit genutzt werden, hängt [jedoch] maßgeblich von der konkreten betrieblichen Umsetzung ab“* (Kretschmer & Spee 2018, S. 7). Wichtig ist an dieser Stelle, dass Digitalisierung fast immer einen Veränderungsprozess bedeutet. Dieser setzt zunächst die Bereitschaft zur Veränderung voraus. Ebenso ist eine Orientierung an den Bedarfen und Bedürfnissen der Beschäftigten und deren Beteiligung (vgl. auch Abschnitt 1.2.5) essenziell für einen erfolgreichen Veränderungsprozess. Prozessorientierung, Wissenstransfer und gute Führung bilden weitere wichtige Faktoren für eine erfolgreiche Implementierung digitaler Prozesse. Nicht jeder Mitarbeiter kommt gleich gut mit Veränderungen zurecht. Wer jedoch grundsätzlich nicht „mitzieht“ und den neuen Technologien, Programmen und Anwendungen negativ gegenübersteht, birgt die Gefahr zu verhindern, dass neue Informationstechnologien und digitale Assistenzsysteme Eingang in das Unternehmen finden.

1.2.2 Digitale Assistenzsysteme

Bei der Näherung an den Begriff „Assistenzsystem“ wird schnell klar, dass die Bezeichnung schwer zu fassen, einzuschränken und zu definieren ist. Das Verbundvorhaben orientiert sich an den Begriffen „Montageassistent“ und „Assistenztechnologie“. Angrenzende Bezeichnungen, die teilweise auch synonym zu digitalen Assistenzsystemen verwendet werden, sind interaktive, technische und intelligente Assistenzsysteme.

Digitale Assistenzsysteme liefern, laut Bundesministerium für Arbeit und Soziales *„dem Nutzer – über Displays, mobile Geräte wie Tablets und Smartphones oder über Datenbrillen – situationsabhängig zusätzliche Informationen zu einem Prozess oder Produkt und können zur Anleitung, technischen Unterstützung oder auch zur Weiterbildung im Arbeitsprozess eingesetzt werden. Intelligente Assistenzsysteme ‚lernen‘ dabei aus bereits erfolgten Abläufen mit individuellen Nutzern“* (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2016, S. 198). Man versteht unter digitalen Assistenzsystemen eine Vielzahl von innovativen Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Anwendungen, die Beschäftigte bei ihrer Arbeit z. B. in der industriellen Montage, bei komplexen Produktions- und Logistikprozessen, bei regelbasierten Planungsprozessen in der Fertigungsplanung oder bei der Instandhaltung und Wartung unterstützen (Böckelmann et al. 2019). Beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme wird im Unternehmen oft das Ziel einer Verbesserung der Arbeitsorganisation, z. B. durch Job Rotation (Gebauer 2017) und Prozessoptimierung im Betrieb, eines effektiveren, ergonomischen und präzisen Arbeitens oder einer Arbeitserleichterung verfolgt, indem Informationen gebündelt und gezielt situationsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Die Systeme erteilen Arbeitsanweisungen, bieten dem Mitarbeiter Lösungen und / oder Entscheidungsunterstützung und ermöglichen, Informationen in Echtzeit auszutauschen. Sie können für die Aus- und Weiterbildung von Mitarbeitern als Wissensvermittler sowie für die individuelle Kompetenzentwicklung eingesetzt werden und somit helfen, die Fähigkeiten des Beschäftigten zu erweitern. Ebenso können diese Systeme eingesetzt werden, um den arbeitenden Benutzer vor Gefährdungen oder (Fehl-)belastungen zu warnen. Im Sinne der Prävention 4.0 und aus Sicht von Arbeits- und Betriebsmedizinern ist, bei Tätigkeiten mit hohem gesundheitlichen Risikopotenzial, ggf. sogar die vollständige Substituierung des Arbeitenden in Betracht zu ziehen, um diesen durch die Übernahme bzw. Automatisierung von Aufgaben vollständig zu entlasten und dadurch dem Verlust der körperlichen Leistungsfähigkeit vorzubeugen. Die neuen Technologien bieten Potenziale für ein gesundes und sicheres Arbeiten.

Weitere Chancen und Risiken sind in Abbildung 3 dargestellt.

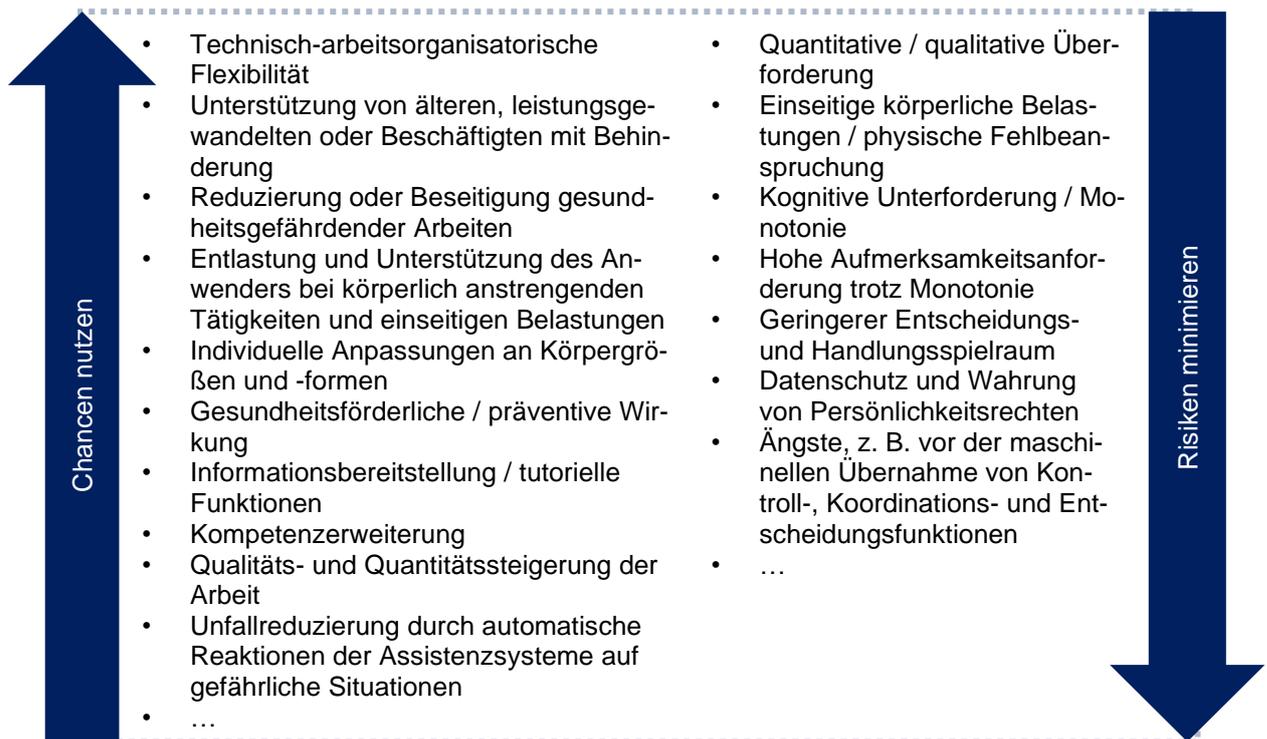


Abbildung 3: Chancen und Risiken digitaler Assistenzsysteme (mod. nach Böckelmann & Minow 2018)

Die Bandbreite digitaler Assistenzsysteme und deren Anwendungsfelder ist groß und kaum überschaubar. Existierende Systeme sind u. a. Pick-by-Voice, Pick-by-Light, Pick-by-Vision, Smart Glasses, In-situ⁴-Projektionen, Spatial⁵ Augmented Reality (AR), Smart Watches, Head-Mounted-Displays (HMD), Tablets, Smartphone und Datenbrillen, die den Mitarbeiter mit visuellen Informationen durch den Arbeitsprozess leiten, indem wesentliche Anweisungen, Daten oder Bilder direkt im Sichtfeld des Beschäftigten eingeblendet werden. Digitale Assistenzsysteme eignen sich jedoch nicht nur für den Produktionsbereich. Die Aufgaben und Einsatzbereiche sind fast unlimitiert. Auch Umweltproblematiken, Kostenexplosionen im Gesundheitswesen oder der Bildungsbereich können von digitalen Assistenten profitieren. Eingesetzt werden Systeme im privaten, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Bereich vom Auto über den Operationssaal (Adler et al. 2010; Croner 2018; Brunner et al. 2019) bis zur Montagelinie.

Die Vielfalt der Systeme und die Uneinheitlichkeit in der Definition von (digitalen) Assistenzsystemen erschweren eine Klassifikation verschiedener Technologien.

Ein mögliches Klassifikationssystem der digitalen Assistenzsysteme stellen Kasselmann & Willeke (2018) dar. Sie unterscheiden Assistenzsysteme hinsichtlich ihrer Technologieart in optische, akustische und haptische Systeme (vgl. Abbildung 4).

⁴ lat. „am Ort“ / „unmittelbar am Ort“ (Drosdowski 1997)

⁵ Spatial AR erweitert Objekte und Szenen der realen Welt, ohne dass spezielle Displays wie Monitore, am Kopf montierte Displays oder tragbare Geräte verwendet werden.

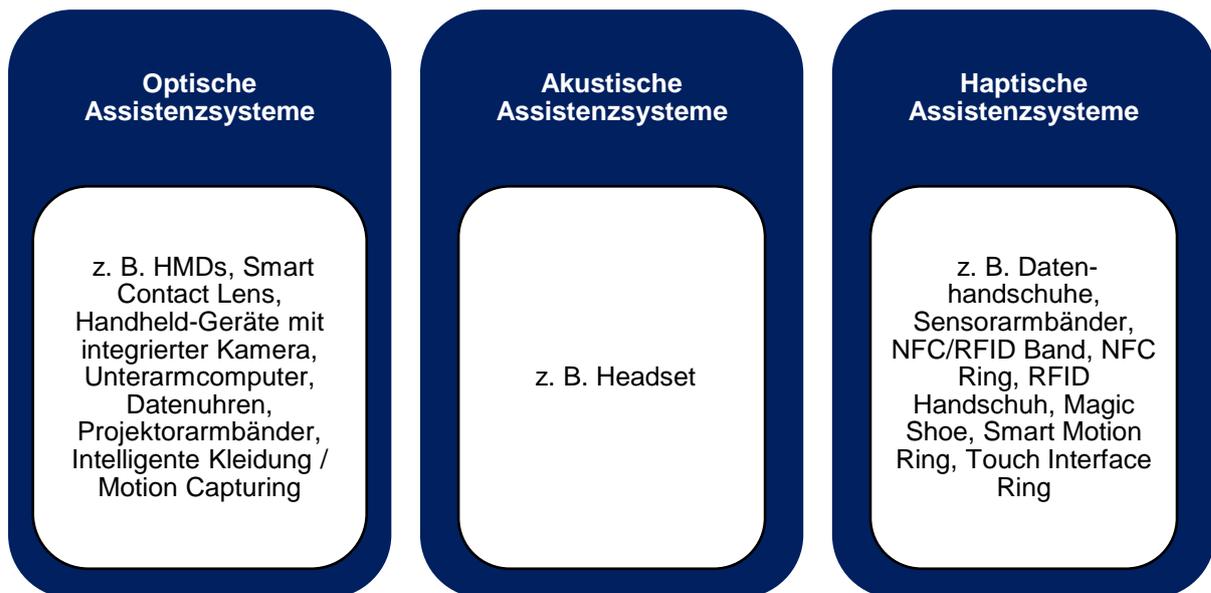


Abbildung 4: Klassifikationssystem digitaler Assistenzsysteme hinsichtlich Technologieart (mod. nach Kasselmann & Willeke 2016)

Eine weitere Einteilung digitaler Assistenzsysteme, die durchaus additiv zu dem Modell von Kasselmann & Willeke (2016) stehen kann, bieten Merkel et al. (2016) an. Sie gliedern Assistenzsysteme hinsichtlich ihres Unterstützungsbereichs (kognitiv oder physisch) und ihrer Anwendungsmobilität (stationär oder portabel) (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Klassifikationssystem digitaler Assistenzsysteme hinsichtlich Unterstützungsbereich und Anwendungsmobilität (mod. nach Merkel et al. 2016)

	Stationäre Systeme	Portable Systeme
Kognitive Unterstützung	z. B. zentrale Displays, Pick-To-Light	z. B. HMDs, Smart Contact Lens, Wearables (u. a. Smartwatches)
Physische Unterstützung	z. B. Mensch-Roboter-Kooperation	z. B. Exoskelette (vgl. Steinhilber et al. (2020))

Die Klassifikation nach Apt et al. (2018) charakterisiert digitale Assistenzsysteme hinsichtlich Art, Grad und Zielsetzung der Unterstützung. Der Grad der Unterstützung kann hier als Anforderungsniveau der auszuführenden Tätigkeiten verstanden werden (vgl. Abbildung 5).

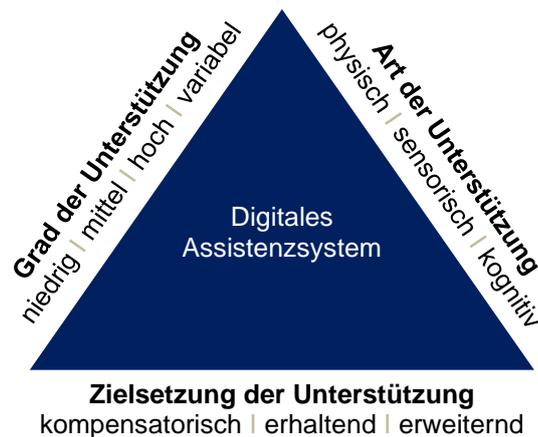


Abbildung 5: Klassifikationssystem digitaler Assistenzsysteme hinsichtlich Grad, Art und Zielsetzung der Unterstützung (mod. nach Apt et al. 2018)

Eine weitere Unterscheidung kann in Primär- und Sekundärassistenz vorgenommen werden. Bei einer Primärassistenz sind alle Informationen für den Benutzer auf den ersten Blick, ohne dass der Nutzer dies aktiv herbeiführen muss, sichtbar. Die Sekundärassistenz benötigt die Aktivierung von Informationen durch den Nutzer, indem z. B. durch das Bewegen der Maus Informationen sichtbar werden (Thiemann 2008).

Es ist zu beachten, dass, je nachdem, um welches Assistenzsystem es sich handelt, verschiedene Organsysteme des Anwenders beansprucht werden können (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Organ- bzw. Funktionsbeanspruchungen bei verschiedenen Arbeitsformen mit Einordnung der Assistenzsysteme in diese Klassifikation (mod. nach Rohmert & Rutenfranz 1983; Böckelmann & Minow 2018)

Typ der Arbeit	Energetische Arbeit			Informatorische Arbeit	
Art der Arbeit	mechanisch	motorisch	reaktiv	kombinativ	kreativ
Was verlangt die Erledigung der Aufgaben von Menschen?	Kräfte abgeben „Mechanische Arbeit“ im Sinne der Physik	Bewegungen ausführen Genauere Bewegungen bei geringer Kraftgabe	Reagieren und Handeln Informationen aufnehmen und darauf reagieren	Informationen kombinieren Informationen mit Gedächtnisinhalten verknüpfen	Informationen erzeugen Verknüpfen von Informationen zu „neuen“ Informationen
Organ- bzw. Funktionsbeanspruchung	Muskeln, Skelett, Atmung, Kreislauf	Sinnesorgane, Muskeln, Kreislauf	Sinnesorgane, Reaktionsfähigkeit, Merkfähigkeit, Muskeln	Denk- und Merkfähigkeit, Sinnesorgane	Denk-, Merk- und Schlussfolgerungsfähigkeit
Beanspruchung	physisch	kombiniert		psychisch	
Assistenzsysteme (AS)	physische AS (z. B. adaptive KUKA-Roboter-Systeme)		sensorische AS (z. B. Augmented Reality-Brille)	kognitionsunterstützende AS (mobile Endgeräte, interaktive Visualisierungssysteme)	

Als sensorische Assistenzsysteme tauchen u. a. AR-Brillen auf. Dabei ist AR nicht gänzlich neu: Erste Arbeiten auf dem Gebiet der digitalen Werker-Unterstützung bei der Montage wurden bereits 1993 durchgeführt. Das sogenannte KARMA (Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance) System wurde verwendet, um einen Kunden mittels HMD durch die Wartung eines Laserdruckers zu leiten (Feiner et al. 1993). Bezogen auf Systeme, die mit virtueller (VR) oder erweiterter / augmentierter Realität arbeiten, kann folgende Einteilung (vgl. Abbildung 6) vorgenommen werden.

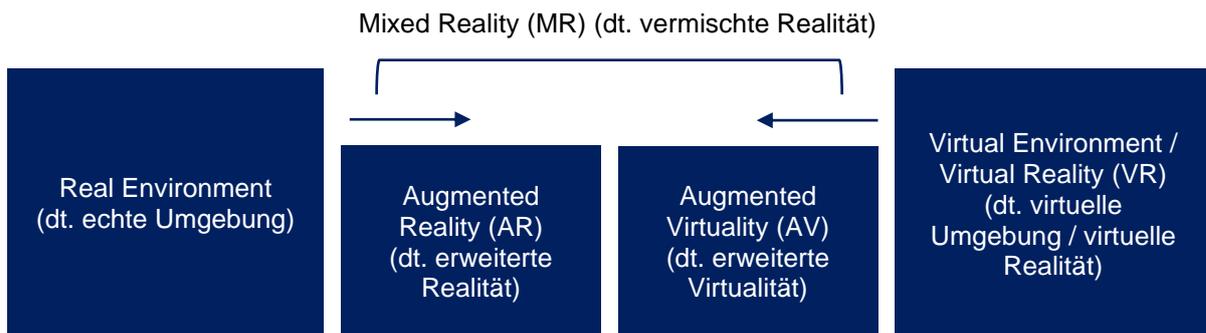


Abbildung 6: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (mod. nach Milgram et al. 1995; Milgram & Colquhoun 1999)

Wie bei digitalen Assistenzsystemen im Allgemeinen ist auch die Definition und Abgrenzung von VR und AR nicht immer eindeutig. VR bezeichnet die Darstellung und Wahrnehmung der Realität mit ihren physikalischen Eigenschaften in einer computererzeugten interaktiven Umgebung in Echtzeit. AR kann verstanden werden als Wahrnehmung der realen Welt unter Erweiterung um virtuelle Elemente. Der Begriff bezieht sich allgemein auf die Erweiterung aller Sinne, die bei Anwendungen auch kombiniert werden können (z. B. visuell und haptisch bei Funk et al. 2016), jedoch ist in der aktuellen Forschung ein Fokus auf die visuelle Augmentierung festzustellen. Zwischen der echten Umgebung und der virtuellen Umgebung existiert die Mixed Reality mit einem fließenden Übergang von der erweiterten Realität zur erweiterten Virtualität. Die erweiterte Realität (AR) beschränkt sich auf wenige zusätzliche virtuelle Elemente, die Hauptaufmerksamkeit des Nutzers liegt auf der echten / natürlichen Umgebung. Bei der erweiterten Virtualität (AV) liegt der Fokus auf der Darstellung der Virtualität. Hier werden nur einzelne Elemente der Realität sichtbar. Durch den Einsatz der beschriebenen Technologien entstehen in der modernen Arbeitswelt neue Mensch-Maschine-Schnittstellen.

Viele Assistenzsysteme sind nach dem Baukastenprinzip aufgebaut, sodass einzelne Elemente kombiniert und ausgetauscht werden können, um die Systeme einfach an verschiedene Nutzer und Arbeitskontexte anzupassen.

Das im Rahmen des Verbundprojektes „3D-Montageassistent“ entwickelte Assistenzsystem kann als visuelle Montageunterstützung bezeichnet werden.

Assistenzsysteme stehen, wie auch die Digitalisierung der Arbeitswelt im Allgemeinen, zwischen verschiedenen Spannungsfeldern. Hasselmann et al. (2018) beschreiben Spannungsfelder digitaler Assistenzsysteme, die zum Teil auch auf die Digitalisierung im Allgemeinen bezogen werden können (vgl. Abbildung 7).

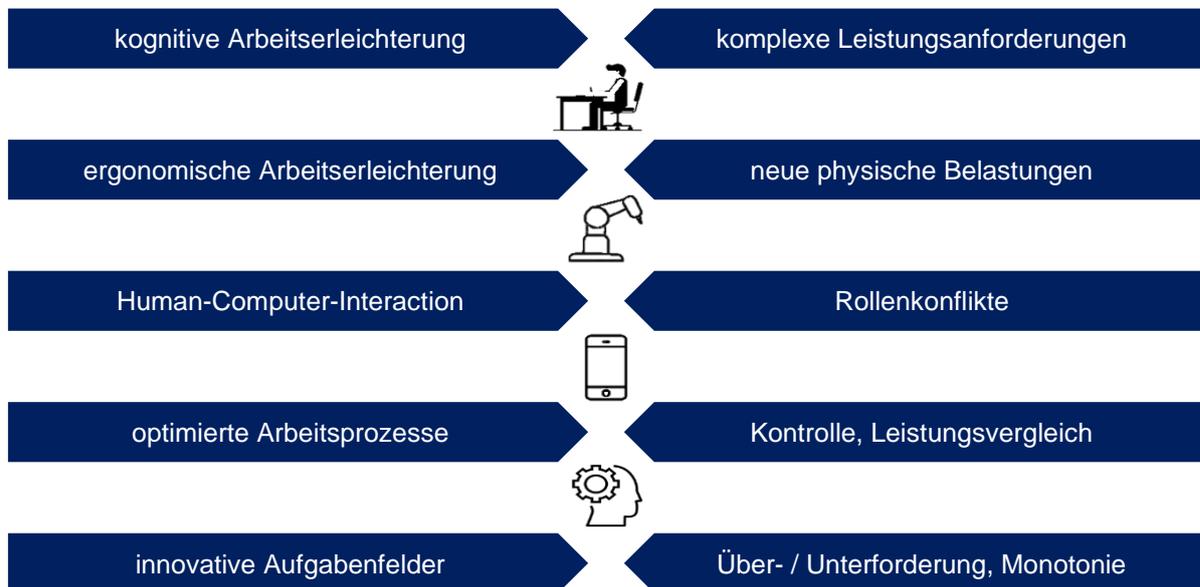


Abbildung 7: Spannungsfelder digitaler Assistenzsysteme (mod. nach Hasselmann et al. 2018)

Die neuen Systeme sollen eine kognitive Arbeitserleichterung für Mitarbeiter mit sich bringen, stellen aber gleichzeitig neue komplexe Leistungsanforderungen an diese. Menschen mit psychischen Beeinträchtigungen müssen in diesem Kontext gesondert berücksichtigt werden. Die grundsätzlich angestrebte ergonomische Arbeitserleichterung kann neue physische Belastungen oder eine physische Unterforderung bewirken (z. B. bei der Umlagerung von Kräften bei Exoskeletten). Eine Interaktion zwischen Mensch und Maschine kann u. a. zu Fragen der Verantwortung (Wer trifft Entscheidungen? Wer ist verantwortlich, wenn Fehler passieren? Wer muss im Notfall eingreifen?) und Rollenkonflikten führen. Digitale Assistenzsysteme können Arbeitsprozesse optimieren, ermöglichen jedoch ebenso eine höhere Kontrolle bei Leistungsvergleichen durch die Erfassung individueller und personenbezogener Daten. Diese „Überwachung“ ist in der Regel kein Ziel, sondern eine Nebenwirkung. Trotzdem erheben und speichern neue Technologien teilweise sensible Daten (z. B. Bewegungsprofile) und bergen die Gefahr des „gläsernen Mitarbeiters“ und des Missbrauchs persönlicher Daten (Nahles & Hofmann 2017). Fragen zur Datenbeschaffung und -aufbereitung sowie zum Datenschutz sollten bei der Entwicklung und Anwendung digitaler Assistenzsysteme deshalb mitgedacht werden. Innovative Aufgabenfelder stehen der Gefahr einer Über- bzw. Unterforderung von Mitarbeitern gegenüber. Werden ganzheitliche Tätigkeiten durch eine Automatisierung auf wenige monotone Kontrollaufgaben reduziert, kann dies zu einer geringeren Aufmerksamkeit des Nutzers führen und in Folge ein hohes Unfallpotenzial bedeuten.

1.2.3 Rechtliche Grundlagen

Der Gestaltung und dem Einsatz digitaler Assistenzsysteme liegen europäische und nationale Gesetze und Verordnungen zugrunde. Sie lassen sich in einem hierarchischen System darstellen (vgl. Abbildung 8) und zeigen auf, dass die europäischen Arbeitsschutzrichtlinien den Rahmen für die nationale Ausgestaltung des Arbeitsschutzes darstellen.



Abbildung 8: Systematik des Arbeitsschutzrechts (Rundnagel 2017)

Zu den rechtsverbindlichen Dokumenten gehören, neben dem Grundgesetz, wie der vorangehenden Abbildung zu entnehmen ist, unter anderem das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) und das Arbeitssicherheitsgesetz (ASiG) sowie Unfallverhütungsvorschriften und staatliche Verordnungen.

Die grundsätzliche ergonomische Gestaltung ist Teil vieler dieser rechtsverbindlichen Vorschriften. Die Ergonomie als Lehre von der menschlichen Arbeit wird häufig definiert als „*maßliche (anthropometrische) Gestaltung von Arbeitsplätzen und Maschinen, d. h. als ein Regelwerk für günstige Körperhaltungen am Arbeitsplatz und den Einsatz der Muskelkraft*“ (Schmauder 2018, S. 23). Dabei umfasst die Ergonomie ebenso die Gestaltung der Arbeitsmittel, -umgebung und -aufgaben sowie die Mensch-Maschine-Interaktion. Sie verfolgt das Ziel, dass Menschen in Arbeitsprozessen menschengerechte Arbeitsbedingungen vorfinden, soziale Standards im Arbeitskontext erfüllt sind und Beschäftigte Handlungsspielräume haben, unter denen sie (neue) Fähigkeiten (weiter)entwickeln können. U. a. in § 2 ArbSchG sowie in

der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) wird die humanzentrierte Gestaltung von Arbeit als Teil des Arbeitsschutzes beschrieben (Schmauder 2018). Die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung ist der Primärprävention zuzuordnen und steht damit in der Rangfolge der Präventionsmaßnahmen an erster Stelle.

Digitalisierung bedeutet zunehmend auch eine „*Generalisierung der Bildschirmarbeit*“ (Kohte 2018, S. 356). Daher wurde die Bildschirmarbeitsverordnung (BildscharbV) 2016 in den Anhang der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) integriert. Sie findet sich in Abschnitt 6 unter „Maßnahmen zur Gestaltung von Bildschirmarbeitsplätzen“ und fasst wichtige Gestaltungshinweise zu visuellen Anzeigen zusammen. Dabei wird auf allgemeine Anforderungen der Bildschirmarbeitsplätze, der Bildschirmgeräte sowie deren ortsgebundene und ortsveränderliche Verwendung und der Benutzerfreundlichkeit von Bildschirmarbeitsplätzen eingegangen. Häufig wird die Umschreibung „angemessen“ verwendet (z. B. „*die Bildschirmgröße und -form müssen der Arbeitsaufgabe angemessen sein*“ Satz 4 Abschnitt 6.2). Wie diese Angemessenheit aussieht, wird jedoch nicht genauer definiert (Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz 2017).

1.2.4 Normen, Richtlinien und Fachinformationen zur Gestaltung digitaler Assistenzsysteme

Wie in Abbildung 8 aufgezeigt, stellen Arbeitsschutz-Normen, -Richtlinien und Fachinformationen einen Teilbereich im systematischen Arbeitsschutzrecht dar. Bei der Recherche innerhalb dieser Thematik zu digitalen Assistenzsystemen ergab sich als zentrale Handlungshilfe zur Gestaltung derartiger Technologien die DIN EN ISO 9241⁶. Auszüge werden im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

Die DIN EN ISO 9241 „Richtlinien der Mensch-System-Interaktion“, bis 2006 mit dem Titel „Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten“ geführt, gibt Empfehlungen zur Gestaltung von Hardware, Software und Arbeitsumgebung mit dem Ziel gesundheitliche Schädigungen bei der Bildschirmarbeit zu vermeiden. In Hinblick auf die Gestaltung interaktiver Systeme im Anwendungsfall dieser Dissertation werden insbesondere die Normteile 11, 110 und 112 als relevant angesehen. Aufgrund dessen wird für die weitere strukturelle Erläuterung der Normteile folgender Aufbau angenommen (vgl. Abbildung 9).

⁶ Die DIN EN ISO 9241 wurde von der europäischen EN ISO 9241 übernommen und entstammt ursprünglich einer Norm der Internationalen Organisation für Normung (ISO).

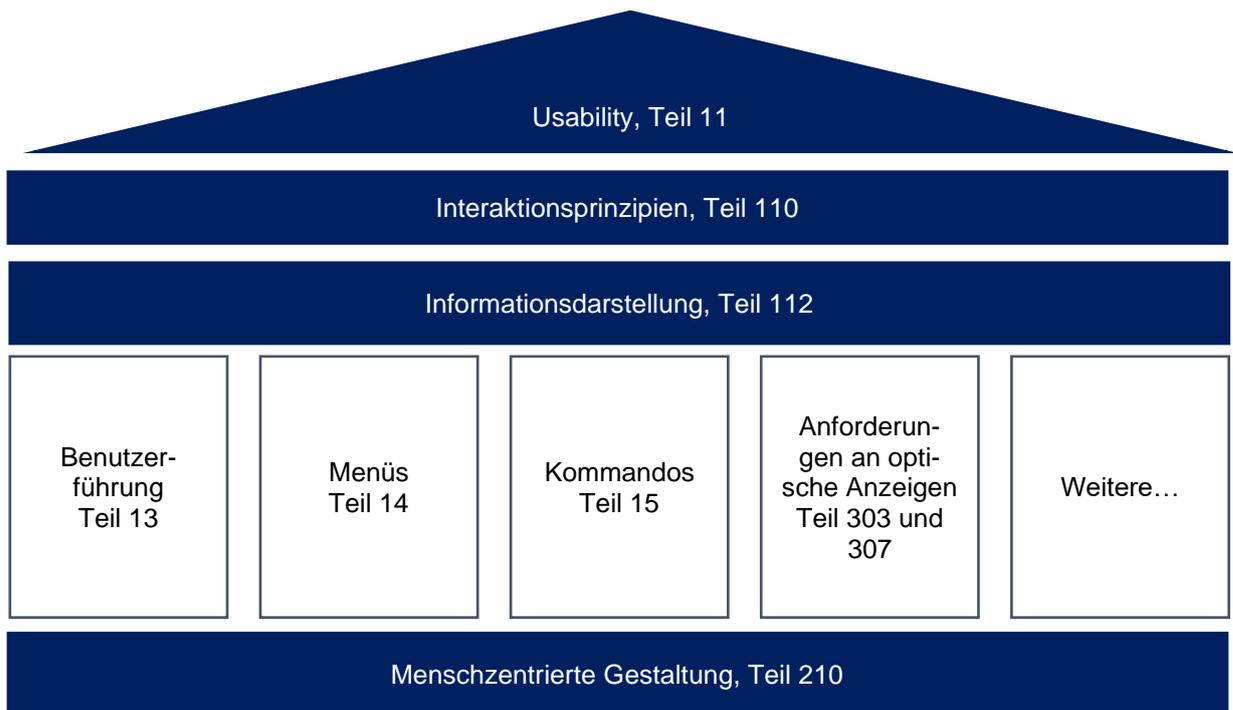


Abbildung 9: Aufbau der DIN EN ISO 9241 mit ausgewählten Normteilen

Der Normteil „Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte“ (Teil 11) macht deutlich, dass die Entwicklung gebrauchstauglicher Systeme und Produkte erforderlich ist, um *„Benutzer zur effektiven, effizienten und zufriedenstellenden Erreichung ihrer Ziele unter Berücksichtigung des jeweiligen Nutzerkontextes zu befähigen“* (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2018b). Usability (dt. Gebrauchstauglichkeit) beschreibt dabei das Ausmaß, in dem bestimmte Nutzer, in einem bestimmten Kontext, bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend erreichen können. Ob eine gute Usability erreicht wird, hängt von verschiedenen Faktoren und deren Wechselwirkungen ab. Dazu zählen Eigenschaften des Systems, Ziele und Arbeitsaufgaben, Benutzermerkmale, Nutzungsumgebung, Organisation und Arbeitsmittel.

Um Systeme gebrauchstauglich zu gestalten, ist eine gute Interaktionsgestaltung wichtig. Sie wird in Teil 110 der DIN EN ISO 9241 beschrieben (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020c). Ihre Prinzipien, die je nach Anwendungsszenario unterschiedlich gewichtet werden können, sind in Abbildung 10 dargestellt.

Die Beachtung der Prinzipien hilft zu vermeiden, dass typische Nutzerprobleme wie irreführende Informationen, unerwartete Antworten des Systems oder unnötige Arbeitsschritte entstehen und sich dadurch die Akzeptanz des Systems verringert.

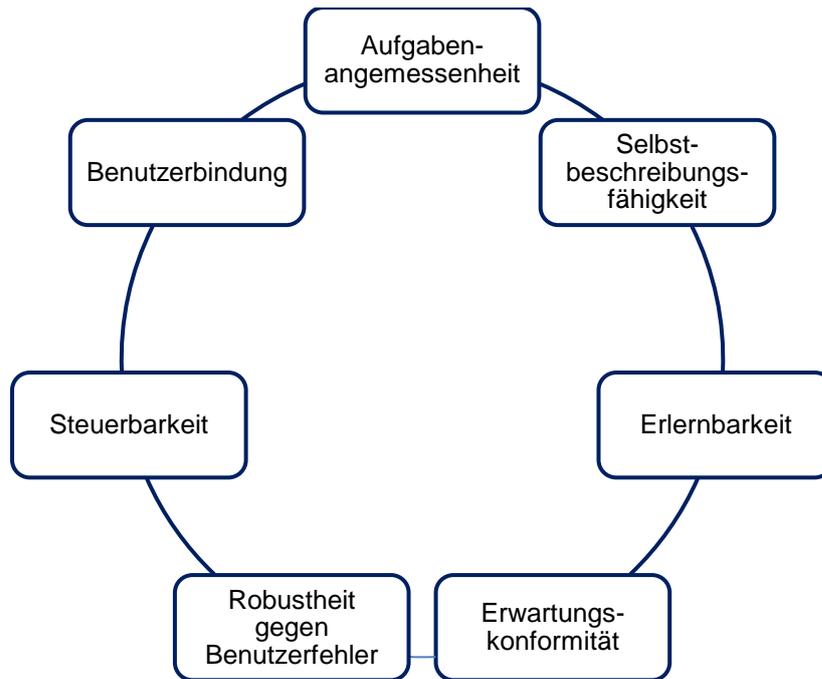


Abbildung 10: Interaktionsprinzipien (mod. nach DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020c)

Ein *aufgabenangemessenes* System unterstützt den Benutzer bei seiner Aufgabenerledigung. Dies schließt u. a. ein, dass das System nur die für den jeweiligen Arbeitsschritt erforderlichen Informationen zur Verfügung stellt, keine Schritte auferlegt, die nicht aus der Aufgabe, sondern aus dem System resultieren und keine Informationen darstellt, die die Aufgabenausführung behindern. Eine optimierte *Selbstbeschreibungsfähigkeit* zeichnet sich dadurch aus, dass die Fähigkeiten des Systems und seine Nutzung unmittelbar verständlich sind. Das bedeutet u. a., dass das System mit einem dem Benutzer vertrauten Vokabular arbeitet, den Fortschritt bei der Aufgabenerledigung anzeigt und dass das Heranziehen von externen Informationen auf ein Minimum beschränkt ist. Ein interaktives System soll *erlernbar* sein, indem es u. a. das Explorieren des Systems ohne negative Konsequenzen erlaubt, den Lernaufwand minimiert und Nutzer befähigt Informationen zu finden, die über die aktuelle Aufgabe hinausgehen. *Erwartungskonformität* beschreibt, dass das System so reagiert, wie der Benutzer es erwartet, d. h. es ist konsistent und entspricht den Nutzermerkmalen hinsichtlich Ausbildung, Erfahrungslevel und Arbeitsgebiet. Die Informationsstruktur ist so gestaltet, dass sie vom Benutzer als natürlich empfunden wird. Dies schließt auch ein, dass sprachliche Konventionen beachtet werden. Ein System soll *robust gegen Benutzerfehler* sein, d. h. es unterstützt den Nutzer bei der Entdeckung und Vermeidung von Fehlern sowie bei der Fehlerbehebung, z. B. indem vorgeschlagene Daten ausgewählt werden können, statt von Hand eingegeben werden müssen und präzise und verständliche Fehlermeldungen ausgegeben werden. Die *Steuerbarkeit* eines interaktiven Systems sollte so gestaltet sein, dass der Benutzer die Kontrolle behält, indem er z. B. den Ablauf startet und seine Richtung und Geschwindigkeit beeinflussen kann, bis er sein

Ziel erreicht hat. Ebenfalls sollte ein Wiederaufnahmepunkt nach einer Unterbrechung und die Reihenfolge der Aufgabenschritte bestimmt werden können. *Benutzerbindung* kann erreicht werden, wenn die Informationen und Funktionen des Systems auf einladende und motivierende Weise dargestellt werden. Bestätigungen über erfolgreich erledigte Aufgaben, ein respektvoller Umgang des Systems mit dem Benutzer und die Möglichkeit Vorschläge zu Systemverbesserungen einzureichen, können positive Effekte haben (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020c).

Normteil 112 der DIN EN ISO 9241 beschreibt Richtlinien des Oberflächendesigns und Grundsätze der Informationsdarstellung. Informationen sollten demnach erkennbar, unterscheidbar, lesbar, klar, verständlich, kompakt / prägnant und konsistent dargestellt werden (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2017). Dabei gilt Normteil 112 übergreifend für die drei Hauptsinnesmodalitäten (visuell, akustisch, taktik / haptisch). Weitere Empfehlungen finden sich in der DIN EN ISO 9241-125 (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2018a) zur visuellen und in der ISO/TS 9241-126 zu auditiven Informationsdarstellung (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2019).

Der humanzentrierte Designprozess (Teil 210) (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020b) stellt gewissermaßen das Fundament der DIN EN ISO 9241 dar. Durch die Anwendung des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses kann das Risiko verringert werden, dass das System von den späteren Anwendern nicht angenommen wird. Die Nutzerzentrierung gilt somit als wesentliche Voraussetzung für die Akzeptanz eines technischen Systems (Brauer et al. 2015; Kleineberg et al. 2017). Dies zeigt sich in gescheiterten Praxisprojekten innerhalb von Unternehmen, bei denen eine niedrige Akzeptanz eines Systems herrscht oder die Assistenzen sogar komplett abgelehnt werden (Kasselmann & Willeke 2018). Zu den Grundsätzen des humanzentrierten Designprozesses zählt u. a., dass die Nutzer während der Gestaltung und Entwicklung der Systeme einbezogen werden (vgl. auch Abschnitt 1.2.5), dass ein umfassendes Verständnis der Benutzer erreicht wird, adäquate Arbeitsaufgaben und -umgebungen vorliegen, dass die User Experience (vgl. Abschnitt 1.2.5) berücksichtigt wird und dass in Forschungs- und Entwicklungsteams fachübergreifende Perspektiven und Kenntnisse berücksichtigt werden. Im Prozess (vgl. Abbildung 11) werden der Nutzungskontext und die -anforderungen festgelegt und mit Beteiligung der Anwender schrittweise Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen erarbeitet und evaluiert. Dieses Vorgehen zielt darauf ab, eine möglichst hohe Akzeptanz für das zu entwickelnde System zu gewährleisten (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020b).

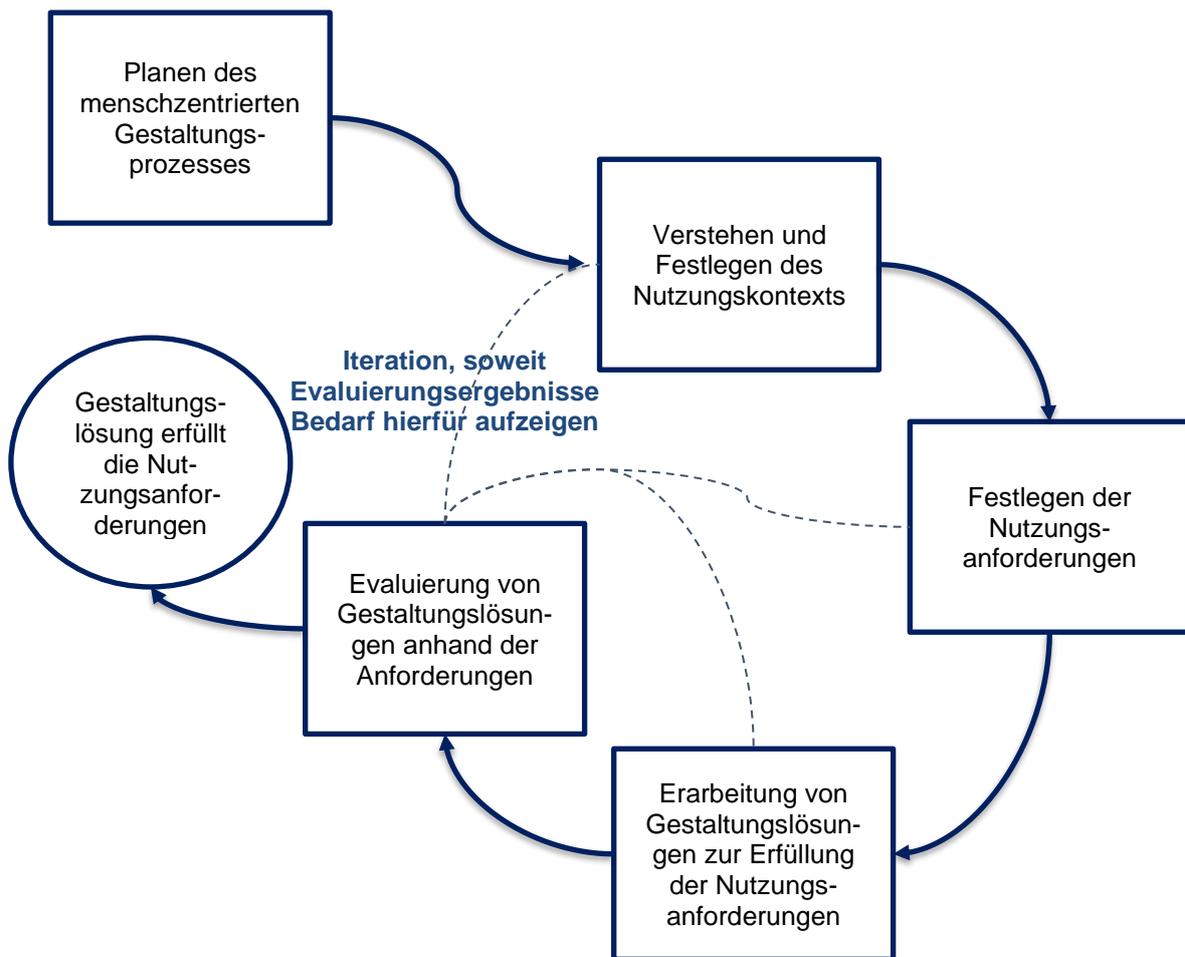


Abbildung 11: Humanzentrierter Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (mod. nach DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020b)

Es existieren viele weitere Normteile zur Gestaltung interaktiver Systeme, z. B. zur Gestaltung der Benutzerführung, zu Menüs und Kommandos und zu Zusammenhängen von Sehentfernungen und Zeichengröße. Ihre Inhalte an dieser Stelle zu erläutern, würde jedoch den Rahmen der Arbeit überschreiten. Daher sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass für die beschriebenen Normen kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

Es können und müssen weitere übergeordnete Handlungshilfen zur Entwicklung und Nutzung von digitalen Assistenzsystemen zu Rate gezogen werden, z. B. „Ergonomie – Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2011a) oder „Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016b). Weitere anschauliche Informationen, die weiterführende und konkrete Hilfestellungen für die Betriebspraxis liefern, ergänzen die DIN-Normen mit praktischen Beispielen (u. a. Völker 2010; Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. 2016; Verwaltungs-Berufsgenossenschaft 2020).

Eine Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme hat gezeigt, dass einige hilfreiche Normteile und Fachinformationen für digitale

Assistenzsysteme existieren (Minow & Böckelmann 2019). Jedoch ist ein Fokus auf Assistenzsysteme mit optischen Anzeigen festzustellen. Da künftig zunehmend auch auditive, taktile, haptische und kombinierte Assistenztechnologien eingesetzt werden (Funk et al. 2016), können praktische Hinweise sowie eine Erweiterung der Normenreihe – wie Teil 910 und 920 der DIN EN ISO 9241 (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2011b; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016a) – für derartige Systeme und deren Entwicklung und schadigungslosen Einsatz hilfreich sein.

Einen ersten Schritt in diese Richtung unternimmt die DIN 92419 zu den Grundsätzen der ergonomischen Gestaltung assistiver Systeme. Die Grundsätze Akzeptanz, Sicherheit, Schutz und Privatsphäre, Optimierung von Folgebeanspruchung, Kontrollierbarkeit, Adaptierbarkeit und Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit sollen ohne Bezug auf einen konkreten Nutzungskontext und damit für verschiedene Benutzer, Endgeräte und Arbeitsplätze gelten (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020a).

1.2.5 *Partizipation, Nutzerakzeptanz, Usability und User Experience*

Partizipation

Zur erfolgreichen und nachhaltigen Implementierung neuer digitaler Assistenzsysteme im Unternehmen ist die frühzeitige Partizipation (aus dem lat. *particeps*, zu dt. *teilnehmend*) der späteren Nutzer ein entscheidender Schlüssel (Kujala 2003). Beteiligung von Mitarbeitern sollte nicht nur heißen, sie zu informieren, sondern sie bei der Zielentwicklung, der Festlegung der Kriterien, der Analyse und Gestaltung der Systeme teilhaben zu lassen und sie als Experten für ihre eigenen Arbeitsbedingungen zu verstehen.

Bereits 1976 behauptet Eason, dass Entwickler von Computersystemen die Fähigkeiten, Einstellungen und Erwartungen der späteren Nutzer nicht ausreichend kennen würden. Dies führe dazu, dass *„designer using himself as the model of the computer user and he can only be far from representative sample“* (Eason 1976, S. 3). Der Maßstab neuer Systeme sei früher häufig an die Entwickler selbst angelegt gewesen. Dies bedeutete für die späteren Nutzer allerdings häufig eine Überforderung in der Komplexität, den Anforderungen, der Informationsfülle und dem Umgang mit neuen Systemen (Eason 1976; Maes 1994; Haase 2018). Daher sollten sich klassische Rollenverteilungen zwischen Technologienentwicklern und Technologienutzern auflösen, sodass Entwickler die Prozessabläufe innerhalb der Tätigkeiten der Mitarbeiter verstehen und Beschäftigte an den Ideen und Möglichkeiten bzw. Grenzen der Entwickler teilhaben können. Beschäftigte können im Rahmen von Workshops, qualitativer Interviews oder kurzer schriftlicher Befragungen zu diesem Thema beteiligt werden. Grundsätzlich sollte, auch im Sinne der präventiv ausgerichteten Arbeitsmedizin, das System den Anforderungen des

Nutzers angepasst werden, nicht umgekehrt. Erst durch diese nutzerorientierte Gestaltung der Assistenzsysteme können diese so konzipiert werden, dass gesundheitspräventive, technologische und wirtschaftliche Potenziale digitaler Technologien in den Unternehmen nutzbar werden.

Nutzerakzeptanz

Durch die Partizipation der zukünftigen Nutzer kann auch die Nutzerakzeptanz gefördert werden. Der Akzeptanzbegriff umschreibt, nach dem lat. „accipere“ das „Annehmen“ oder „Einwilligen“. Nutzerakzeptanz definiert damit im übertragenen Sinne die Bereitschaft des Nutzers, etwas oder jemanden zu akzeptieren (Drosdowski 1997). Zur Vorhersage der Nutzer- bzw. Technologieakzeptanz, also inwiefern ein Nutzer eine bestimmte Technologie akzeptiert, existieren vielfältige theoretische Modelle. Eines ist das Technologie-Akzeptanz-Modell (Technology Acceptance Model, TAM), das mehrmals nach Davis (1986) modifiziert wurde. Metaanalysen haben das Modell bestätigt (u. a. King & He 2006).

Venkatesh und Davis (1996) gehen davon aus, dass vor dem schlussendlichen Nutzungsverhalten (Usage Behaviour) die Verhaltensintention des Nutzers steht, ein System zukünftig zu nutzen (Behavioral Intention). Die Behavioral Intention wird durch die wahrgenommene Nützlichkeit (Perceived Usefulness) und die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (Perceived Ease of Use) bestimmt. Zudem haben externe Drittvariablen (External Variables) Einfluss auf die wahrgenommene Nützlichkeit und die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit einer Technologie (vgl. Abbildung 12).

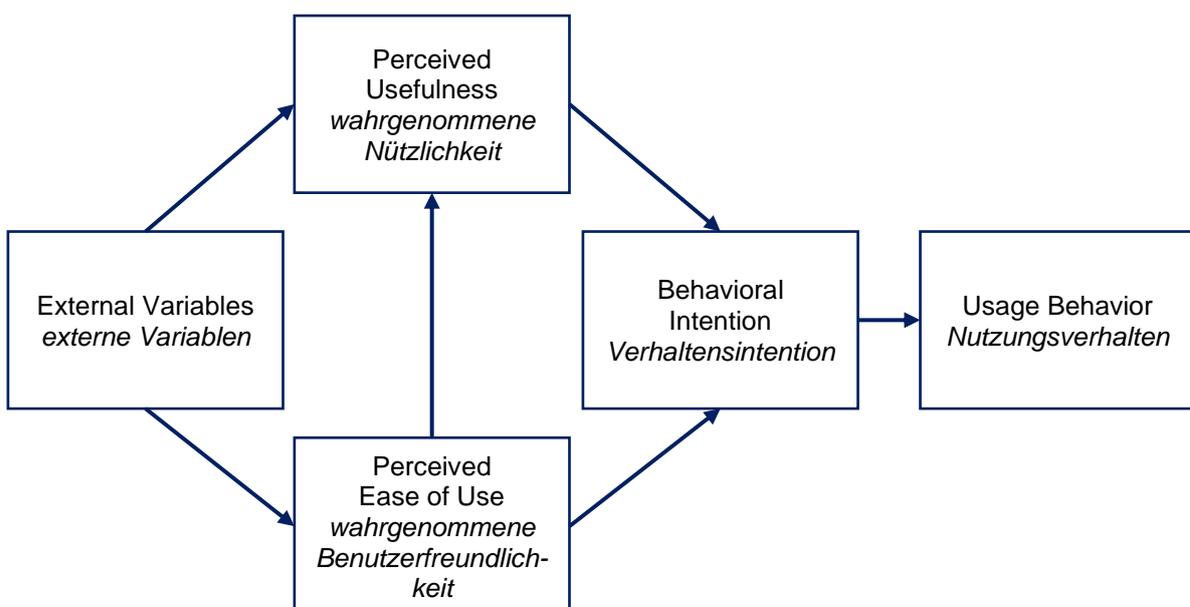


Abbildung 12: Technologie-Akzeptanz-Modell (mod. nach Venkatesh & Davis 1996)

Davis (1989) geht davon aus, dass Technologien von Mitarbeitern nur akzeptiert werden, wenn sie von den Technologien nicht beeinträchtigt werden, sie als sinnvoll empfinden und das System einfach zu bedienen ist.

Ein weiteres bekanntes Modell zur Erklärung der Nutzerakzeptanz bei Informationstechnologien ist die vereinheitlichte Theorie der Akzeptanz und Nutzung von Technologie (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology, UTAUT), die mehrere Theorien der Akzeptanzforschung (u. a. TAM) in einem Modell zusammenfasst (Venkatesh et al. 2003) und die in Abbildung 13 dargestellten Determinanten und moderierenden Variablen beinhaltet.

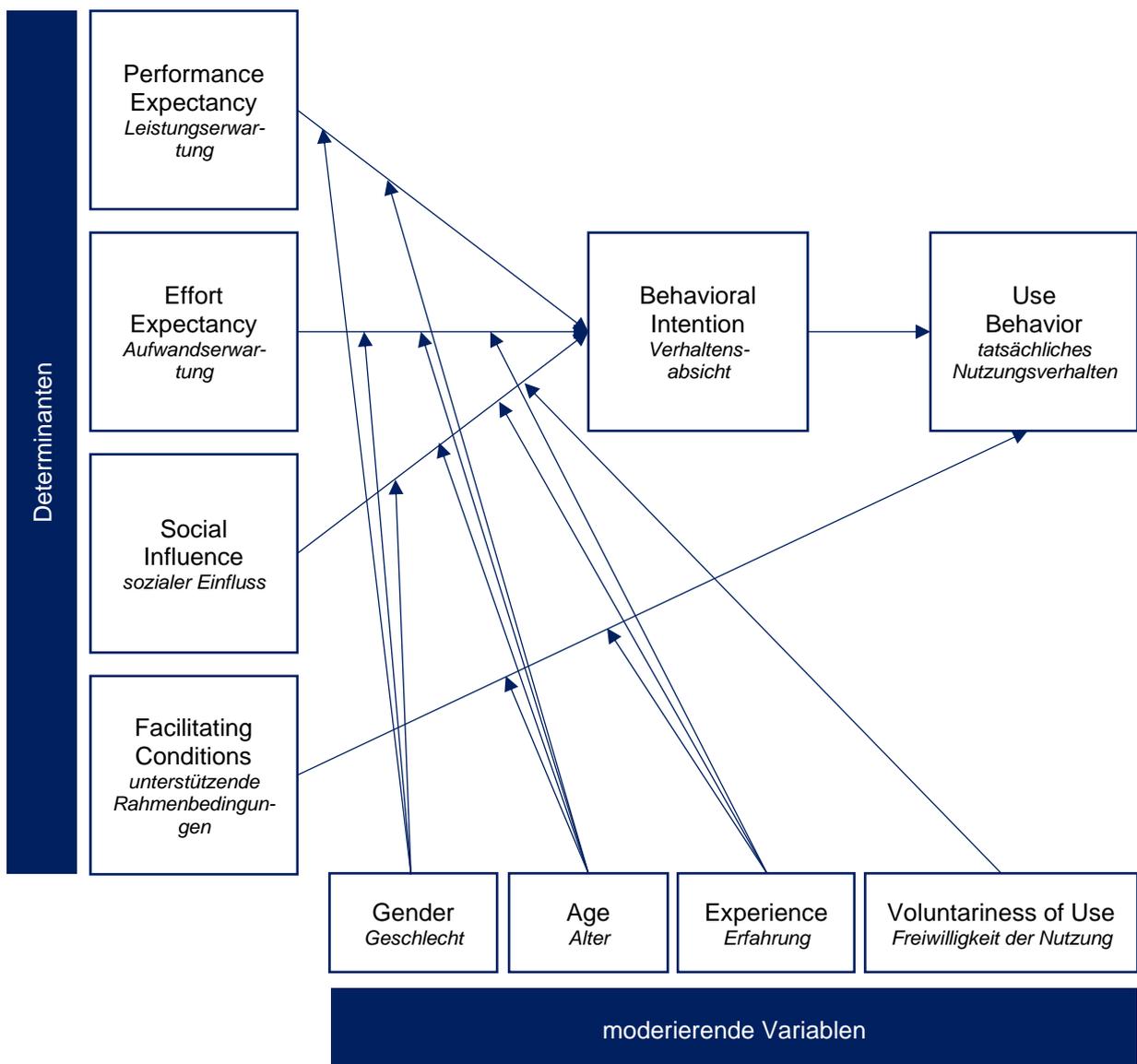


Abbildung 13: Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (mod. nach Venkatesh et al. 2003)

Müller-Böling & Müller (1986) stellen ein allgemeines Akzeptanzmodell auf, indem sie Einstellungs- und Verhaltensakzeptanz als Konstrukte definieren und damit verschiedene Benutzertypen festlegen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Benutzertypen des allgemeinen Akzeptanzmodells (mod. nach Müller-Böling & Müller 1986)

		Verhaltensakzeptanz	
		ja	nein
Einstellungsakzeptanz	ja	überzeugte Benutzer	verhinderte Benutzer
	nein	gezwungene Benutzer	überzeugte Nicht-Benutzer

Ein ähnliches, wenn auch erweitertes Modell, führt Kollmann (1988) auf, indem er den Akzeptanzprozess mit den Ebenen Einstellungs-, Handlungs- und Nutzungsakzeptanz verbindet und somit eine multidimensionale dynamische Anschauung möglich macht (vgl. Abbildung 14).

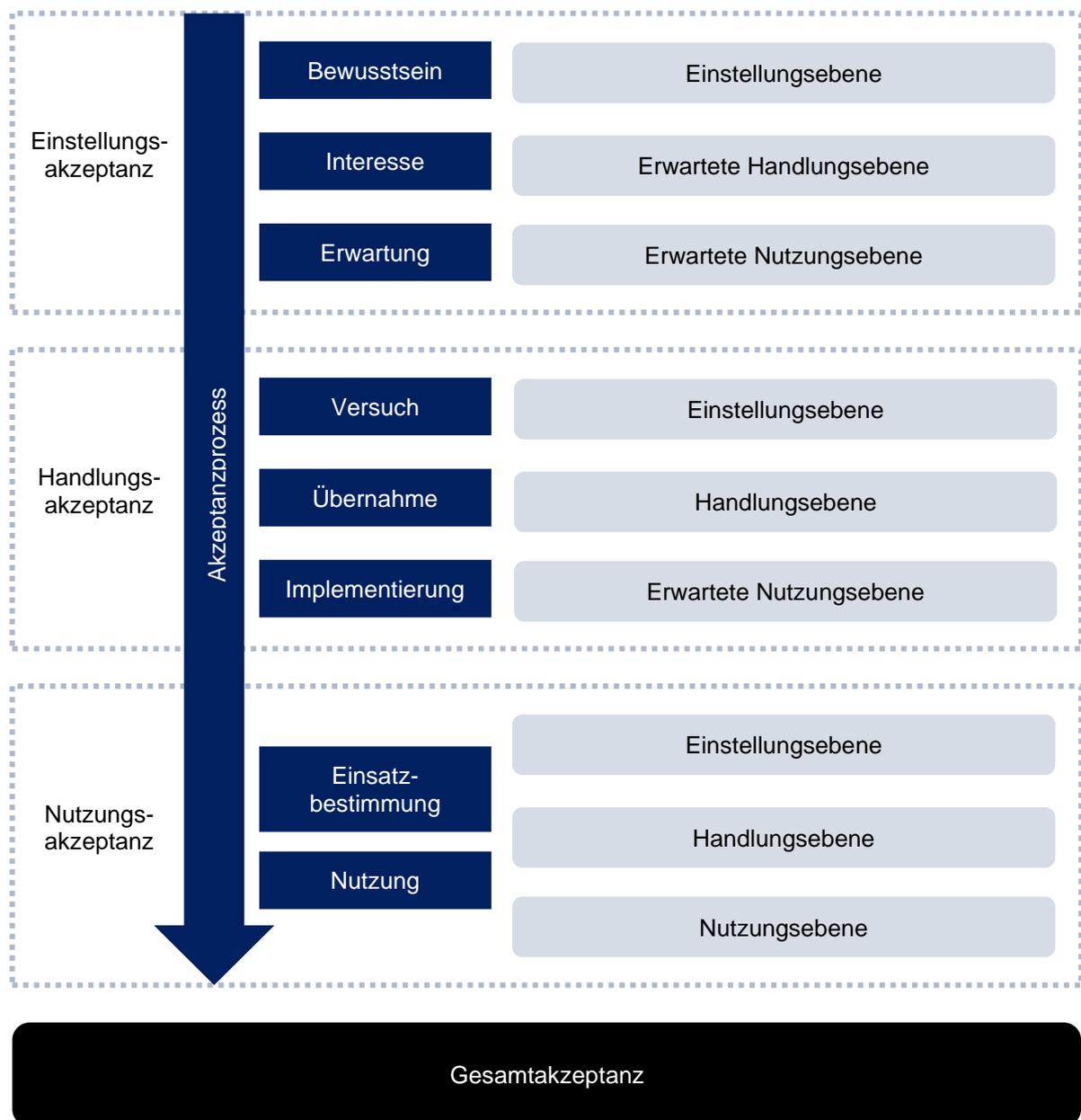


Abbildung 14: Dynamisches Akzeptanzmodell (mod. nach Kollmann 1988)

Je nach Anwendungsfall sollten die vielfältigen Faktoren der Nutzerakzeptanz bei der Erforschung und beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme beachtet werden, um ein möglichst umfassendes Bild zur Annahme der neuen Technologie zu bekommen. Zur abschließenden Evaluation eines digitalen Assistenzsystems vor dem Einsatz im Feld kann ein User Acceptance Test (UAT) durchgeführt werden (u. a. Hambling & van Goethem 2013), der die Gesamtfunktionalität eines Produktes betrachtet. In einem UAT geht es um die finale Überprüfung eines Systems und um die Frage, ob das System dem realen Umfeld standhält und von den Anwendern angenommen wird. Eine gute Nutzerakzeptanz bei digitalen Assistenzsystemen zu kreieren ist eine große Herausforderung. Nicht bei allen Systemen entstehen Schwierigkeiten. Smartphones werden beispielsweise privat meist selbstverständlich genutzt. Anders kann sich die Nutzung der gleichen Technologie im Arbeitsbereich schwierig gestalten, wenn z. B. eine Leistungsüberwachung befürchtet wird. Unbekanntere Systeme (z. B. VR- und AR-Anwendungen) werden, verglichen mit gängigen Assistenten wie Smartphones oder Tablets, mitunter schwieriger zu implementieren sein.

Usability

Usability beschreibt, wie in Abschnitt 1.2.4 erläutert, das Ausmaß, in dem bestimmte Nutzer, in einem bestimmten Kontext, bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend erreichen können (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2018b). Zur Ermittlung der Usability sollten verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Eine Dokumentenanalyse eignet sich zur Einschätzung der *Effektivität* (d. h.: Können Nutzer ihre Ziele mit dem System erreichen?). Mit teilnehmenden Beobachtungen oder objektiven physiologischen Beanspruchungsmessungen kann die *Effizienz* (d. h.: Wie hoch ist die benötigte Anstrengung, um das Ziel zu erreichen?) ermittelt werden. Letztendlich eignen sich subjektive qualitative oder quantitative Nutzerbefragungen für die Bestimmung der *Zufriedenheit* bei dem Einsatz dieses Systems.

Zum Vergleich verschiedener Systeme, zu einem allgemeinen Überblick oder zur abschließenden Evaluation eignet sich u. a. die System Usability Scale (SUS) (Brooke 1986). In der iterativen Entwicklung von Assistenzsystemen empfehlen sich jedoch standardisierte Fragebögen, mithilfe derer verschiedene Themenbereiche abgefragt werden. Möglich sind hier Fragebögen, die sich an den Grundsätzen der Dialoggestaltung (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2008) orientieren, u. a. der ISONORM (Prümper 1997), Iso-Metrics (Gediga & Hamborg 1999) und ErgoNorm (Dzida et al. 2000). Weitere Instrumente zur Ermittlung der Usability bzw. einzelne Aspekte der User Experience sind der Post Study System Usability Questionnaire (PSSUQ) (Lewis 1992; Sauro & Lewis 2012) oder das Software Usability Measurement Inventory (SUMI) (Kirakowski 1996).

User Experience

Eine gute Usability ist eine wichtige Voraussetzung zur Nutzung digitaler Assistenzsysteme, jedoch nicht ausreichend für eine positive Nutzererfahrung, denn auch die individuellen und emotionalen Erfahrungen und Erlebnisse bei der Interaktion mit einem System sind im Forschungs- und Entwicklungsprozess neuartiger Assistenztechnologien zu beachten (Rinkenaer 2020). User Experience kann definiert werden als *„Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung [...] eines Systems [...] resultieren. [...] Dies umfasst sämtliche Emotionen, Vorstellungen, Vorlieben, Wahrnehmungen, physiologische[...] und psychologische[...] Reaktionen, Verhaltensweisen und Leistungen, die sich vor, während und nach der Nutzung ergeben“* (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2020b, S. 7). Sie kann auch mit *Nutzererlebnis* oder *Anwendererlebnis* übersetzt werden und stellt gewissermaßen eine Erweiterung der Usability um ästhetische und emotionale Faktoren dar, in der es u. a. um eine begehrenswerte Gestaltung und Spaß bei der Nutzung geht. Wie zur Usability existieren auch zur Beurteilung der User Experience vielfältige Methoden und Fragebögen. Häufig genutzte Fragebögen sind der INTUI (Ullrich & Diefenbach 2010), der AttrakDiff (Hassenzahl et al. 2003), der User Experience Questionnaire (UEQ) (Laugwitz et al. 2006) und der Questionnaire for User Interaction Satisfaction (QUIS) (Shneiderman 1987; Chin et al. 1988).

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Modelle und Fragebögen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie stellen nur eine Auswahl der häufig gebrauchten und üblichen Methoden im Gebiet der Entwicklung und des Einsatzes digitaler Assistenzsysteme dar. Zudem können Fragebögen zur Usability und User Experience nicht immer eindeutig einem der beiden Begriffe zugeordnet werden. Teilweise umfassen die Fragebögen übergreifend Aspekte aus beiden Konstrukten.

1.2.6 *Belastungs-Beanspruchungs-Konzept*

Aus arbeitsmedizinischer und -physiologischer Sicht ist die Beachtung von Partizipation-, Akzeptanz-, Usability- und User Experience-Faktoren ein sehr wichtiger, aber zur Erfassung von gesundheitlichen Auswirkungen bei der Einführung neuer Technologien noch unzureichender Schritt. Hier spielt die Erfassung und Beurteilung von arbeitsbedingter Belastung und Beanspruchung eine entscheidende Rolle.

Die in der Ergonomie und Arbeitsmedizin angewandten Begriffe „Belastung“ und „Beanspruchung“ entstammen ursprünglich der technischen Mechanik. *„Belastung meint dort die Gesamtheit der äußeren Einwirkungen, z. B. Kräfte, die auf ein Bauteil einwirken, während unter Beanspruchung die daraus resultierenden inneren Spannungen in dem Bauteil verstanden*

werden. Letztere hängen sowohl von der Höhe der Belastung als auch der Geometrie und Werkstoffeigenschaften des Bauteils ab“ (Schlick et al. 2010, S. 38). Übertragen auf die Arbeitswissenschaft wird unter Belastung die Gesamtheit aller erfassbarer Einflüsse verstanden, die von außen auf den Menschen zukommen und auf ihn einwirken (z. B. Arbeitsaufgabe, physische und soziale Arbeitsumgebung, Ausführungsbedingungen), während die Beanspruchung die physischen und psychischen Auswirkungen der Belastung auf den Menschen in Abhängigkeit seiner individuellen Voraussetzungen und Bewältigungsstrategien meint (Schlick et al. 2010). Zur Quantifizierung der Beanspruchung wird diese in die subjektive und objektive Ebene unterschieden.

Zur Beleuchtung der subjektiven Perspektive werden arbeitspsychologische Verfahren eingesetzt, die die erlebte Beanspruchung aus Sicht der ausführenden Person retrospektiv erfassen. Die vielfältigen Verfahren können in ein- und mehrdimensionale Skalen unterteilt werden. Einige Beispiele finden sich bei (Böckelmann & Seibt 2011).

Zur Messung der objektiven Beanspruchung werden valide arbeitsphysiologische Verfahren eingesetzt, die die physiologische Reaktion der ausführenden Person erfassen. Klassische Verfahren, die für diesen Zweck eingesetzt werden sind u. a. Herzfrequenz(-variabilität), Stresshormone, Blutdruck, Atmung, okulomotorische Verfahren wie Augenbewegung, Pupillengröße und Lidschluss, Elektroenzephalogramm (EEG) und Hautleitwiderstand (Boucsein 1991; Böckelmann & Seibt 2011; Jeschke et al. 2016). Die Analyse der Herzratenvariabilität (HRV) wird in den letzten Jahren nicht nur in der klinischen Medizin (z. B. zur Risikostratifizierung), sondern auch in der betriebsärztlichen, präventiv ausgerichteten Praxis zunehmend angewendet und gewinnt hier an Bedeutung (Pfister et al. 2007; Böckelmann 2012). Zudem stellt sie einen neuen Beanspruchungsindikator in arbeitsphysiologischen Belastungs-Beanspruchungs-Analysen dar (Minow & Böckelmann 2018a). Die HRV-Analyse basiert dabei auf der Erfassung der Abstände zwischen zwei R-Zacken im Elektrokardiogramm (EKG) bzw. deren Differenz und analysiert damit die Variabilität dieser Kardiointervalle. Sie hat gegenüber anderen Verfahren der Beanspruchungsanalyse den Vorteil, dass Aussagen zum Beanspruchungszustand nicht nur nach, sondern auch während einer Untersuchung getätigt werden können. Die Herzschlagfrequenz neigt zu einer gewissen Variabilität, die durch kardiovaskuläre, kardiopulmonale und vegetative Regelkreisläufe beeinflusst wird. Eine hohe Variabilität deutet auf eine gute Regulation und damit hohe Anpassungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems hin.

Die Begriffe „Belastung“ und „Beanspruchung“ sind essenzieller Bestandteil des arbeitswissenschaftlichen Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts. Das ursprüngliche Konzept nach Rohmert und Rutenfranz (1983) betrachtet dabei jedoch nur einen Ursache-Wirkungs-Zusam-

menhang, in welchem eine Belastung auf den Menschen wirkt und abhängig von seinen individuellen Ressourcen eine Beanspruchung hervorruft. Das integrierte Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (Scheuch & Schröder 1990) greift zusätzlich Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren und die Handlungsregulationstheorie auf, nach der Belastungen von außen auf den Menschen einwirken und je nach individuellen Ressourcen Beanspruchungen zur Folge haben können. Eine mögliche Darstellungsform findet sich in Abbildung 15.

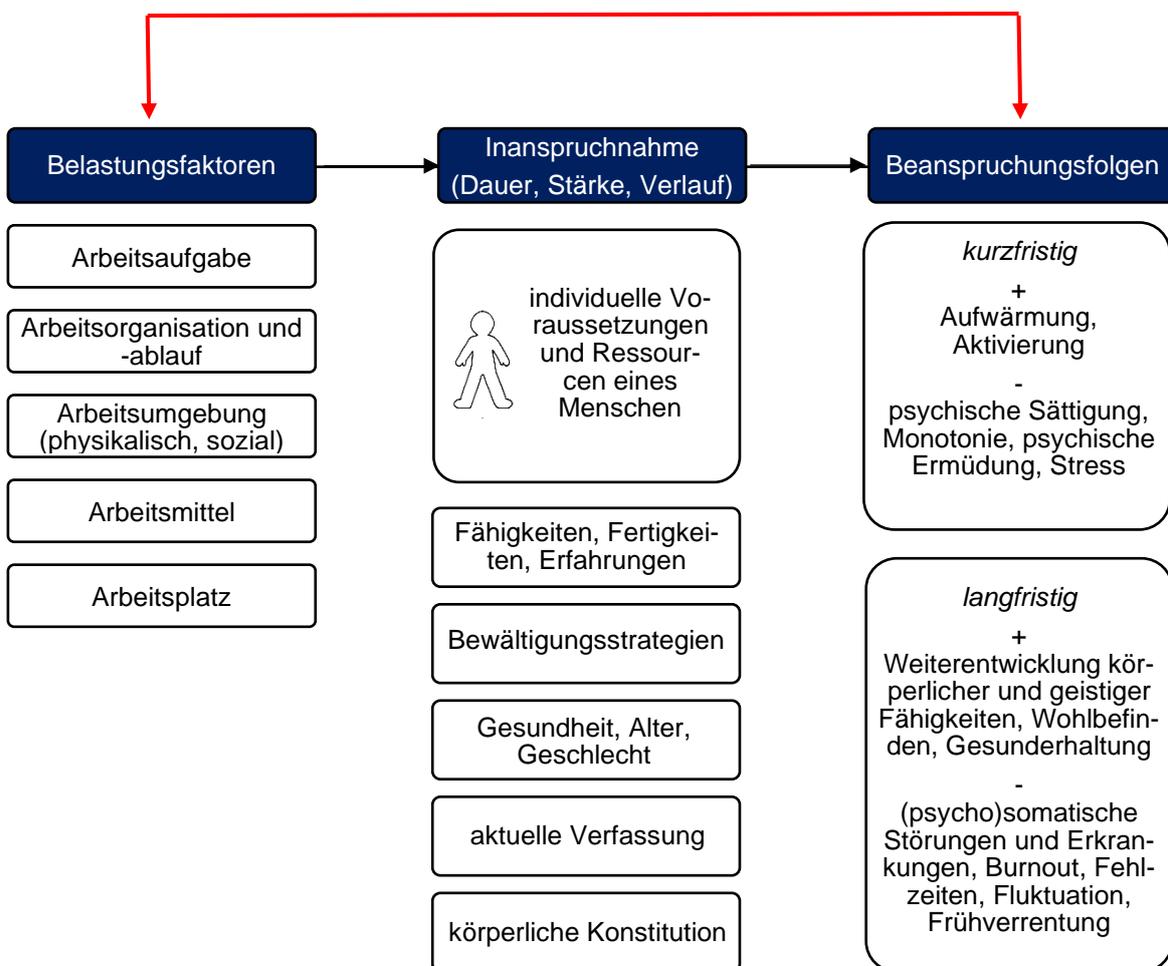


Abbildung 15: Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (mod. nach Rohmert & Rutenfranz 1983; Scheuch & Schröder 1990; Scheuch 2011) (Bemerkung +: positive Beanspruchungsfolge; -: negative Beanspruchungsfolge; roter Pfeil nur in integriertem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept)

Es zeigt sich, dass Belastungsfaktoren, wie Arbeitsaufgabe und -organisation, Arbeitsumgebung und -mittel auf einen Menschen wirken und abhängig von seinen individuellen Voraussetzungen und Ressourcen kurzfristige oder langfristige positive oder negative Beanspruchungen zur Folge haben. In dem ganzheitlichen Modell von Scheuch & Schröder (1990) wirken diese Beanspruchungsfolgen wie im Regelkreis zurück auf den Menschen, d. h. die „*Beanspruchung einschließlich der Bewältigung ist nicht nur Folge, sondern auch Beeinflussende von Belastungen und individuellen Voraussetzungen*“ (Scheuch 2011, S. 417). An dieser Stelle

ist zudem zu ergänzen, dass niedrige Belastungen nicht immer wünschenswert sind. Belastungen sollten sich eher in einem Bereich befinden, indem sie keine Über- jedoch auch keine Unterforderung erzeugen. Beispielhaft sei hier der u-förmige Zusammenhang zwischen mentaler Beanspruchung und Leistung genannt (Neerincx & Griffioen 1996).

Bezogen auf den Gegenstand dieser Arbeit, stellt der Einsatz digitaler Assistenzsysteme äußere Anforderungen an den Nutzer, wie z. B. die Interaktion mit dem System, das Lesen der Arbeitsaufgabe auf einem visuellen Ausgabegerät oder einer veränderten Arbeitsumgebung. Faktoren wie Arbeitsorganisation, Arbeitsumgebung und Arbeitsaufgabe wirken damit als objektive Arbeitsbelastung auf den Menschen und erzeugen bei ihm – abhängig von den individuellen Ressourcen – eine Beanspruchung. Dieselbe Belastung kann bei unterschiedlichen Personen zu unterschiedlichen Beanspruchungen führen. Zudem kann dieselbe Belastung bei derselben Person zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu unterschiedlichen Beanspruchungen führen. Diese Aussagen sollten Betriebsärzte bei der Einschätzung der Beanspruchung nicht vernachlässigen.

1.2.7 Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf nutzerbezogene Aspekte

Der BKK-Gesundheitsreport mit dem Schwerpunkt psychische Belastungen und Erkrankungen zeigt, dass sich die Anzahl der Arbeitsunfähigkeitstage (AU-Tage) aufgrund psychiatrischer Diagnosen zwischen 2008 und 2018 mehr als verdoppelt hat. Mit 16 % stehen sie mittlerweile auf dem dritten Platz der Ursachen für Arbeitsunfähigkeit (Rennert et al. 2019). Die Arbeitswelt 4.0 wird nicht selten als ursächlicher Faktor dieser Entwicklung angesehen. Hinter den beschriebenen Zahlen kann sich, entgegen vieler medialer und öffentlicher Meinungen, aber auch eine veränderte Diagnosepraxis verbergen und kein tatsächlicher enormer Anstieg psychischer Erkrankungen. Die öffentliche Aufmerksamkeit, das Verständnis, die Diagnose- und Behandlungsmöglichkeiten für Menschen mit psychischen Erkrankungen haben sich in den letzten Jahren deutlich verbessert. Es ist davon auszugehen, dass psychische Erkrankungen in der Vergangenheit eher unterdiagnostiziert waren und heute von einem richtigen „*Erkennen vormals übersehener Fälle*“ (Jacobi & Linden 2018, S. 532) gesprochen werden kann. Die Autoren beschreiben auch, dass „*moderne Arbeitswelten (z. B. weniger körperliche, aber vermehrte soziale, kognitive und emotionale Anforderungen) [nicht] per se krank machen, [...] sie [stellen jedoch] neue Herausforderungen dar, indem spezielle Beeinträchtigungsmuster in heutigen Arbeitskontexten zu neuen Passungsproblemen bei Betroffenen mit psychischen Störungen führen*“ (Jacobi & Linden 2018, S. 530).

Welche übergeordneten Veränderungen mit Arbeit 4.0 einhergehen, ist weitreichend bekannt und wurde in Abschnitt 1.2.1 beschrieben. Welche neuen Belastungen beim Einsatz digitaler

Assistenzsysteme entstehen und welche Auswirkungen in Form von Beanspruchungsreaktionen und Beanspruchungsfolgen diese haben, ist jedoch nur teilweise erforscht.

Obwohl derartige Systeme seit Jahren in Forschungs- und Entwicklungsprojekten konstruiert und teilweise in Unternehmen implementiert werden (Kunze 2017), stellten Swan & Gabbard (2005) bereits vor 16 Jahren in einem systematischen Review fest, dass nutzerbezogene Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion bis dahin kaum betrachtet wurden. Die Autoren untersuchten erstmals in einem systematischen Review, inwiefern nutzerbezogene Aspekte wie Belastung und Beanspruchung in AR- und VR-Publikationen beachtet wurden. Sie überprüften 1.104 Publikationen und konnten zeigen, dass nur knapp 2 % der Veröffentlichungen Nutzerstudien durchführten. Auch aktuellere Forschungsarbeiten (vgl. auch Tabelle 4) und systematische Reviews und Übersichtsarbeiten (Dey et al. 2018; Minow & Böckelmann 2018b) zeigen seitdem keine wesentlichen Verbesserungen. Dey et al. (2018) berichten in ihrem Review unter Berücksichtigung von 291 Veröffentlichungen mit 369 Einzelstudien von weniger als 10 % der Studien, die User-Tests durchführen. Zusammenfassend wird deutlich, dass die Anzahl der Publikationen im AR-Bereich zwar steigt, der Anteil derer, die nutzerbezogene Aspekte berücksichtigen, jedoch immer noch auf einem geringen Niveau stagniert. Die Tendenz von einer technologie- zu einer humanzentrierten Entwicklung von AR-Systemen ist erkennbar, jedoch nicht ausreichend, um bestehende Forschungslücken zu schließen.

Für diese Dissertationsschrift wurde ergänzend eine selektive Literaturrecherche (Ende der Literaturrecherche 20.08.2020) zu den Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf nutzerbezogene Aspekte (objektive und subjektive Beanspruchung, objektive Leistung, Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz) durchgeführt. Da in einer ersten systematischen Recherche (Minow & Böckelmann 2018b) nur wenige Treffer erzielt werden konnten, wurde die Suche mit erweiterten Suchbegriffen (vgl. A1: Auswahl der Suchstringkomponenten zu nutzerbezogenen Aspekten beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme) selektiv und per Handsuche ergänzt. Eine Studienübersicht findet sich in Tabelle 4. Es wird ein Fokus auf visuelle Assistenztechnologien gelegt, die bei manuellen Tätigkeiten zur kognitiven Unterstützung eingesetzt werden.

Tabelle 4: Studienübersicht zu den Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf nutzerbezogene Aspekte

Autoren Jahr (Land)	Stichprobe Anzahl der Pro- banden (n), (MW Alter in Jahren \pm SD; Min - Max), An- zahl 	Assistenz- technologie	Untersu- chungssetting (angestrebte Anwendung)	Test / Kondition	Testdauer (TD) (alternativ: Ver- suchsdauer (VD))	Outcome-Parameter			
						Objektive Beanspruchung	Subjektive Beanspruchung	Objektive Leistung	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz
Aringer-Walch et al. 2018 (Deutschland)	8 (41 \pm k. A.; k. A.), 1	Montageassis- tenzsystem, welches durch Bildverarbei- tungssoftware den aktuellen Montagestand erfasst und durch einen Bildschirm die Monteure über den nächsten Arbeitsschritt informiert	Labor (Montage)	drei Montage- aufgaben mit steigender Schwierigkeit (Teileanzahl und -ausführung)	TD: 15 min. VD: 70-80 min.	-	-	-	grundsätzliche Akzeptanz des Systems, positives Si- cherheitsgefühl, Schutz vor individuellen Fehlern, mög- licher Verlust an Kompe- tenz und Autonomie wird kritisiert (mittels eigener Fragebögen und Interviews angelehnt an SUS, TAM, Bedürfniskarten)
Bächler et al. 2016 (Deutschland)	24 (28,6 \pm 10,9; 20 - 54), 8	Pick-by-Light, Pick-by-Paper, Pick-by-Display und Pick-by- Projection	Labor (Kommissionie- rung)	Kommissio- nieraufgaben	VD: 90 min.	-	keine signifikanten Unter- schiede, bei Pick-by-Light tendenziell am kleinsten, bei Pick-by-Display am höchsten (mittels NASA- TLX)	Pick-by-Light signifikant schneller als die anderen Methoden; kein signifikan- ter Unterschied bei Fehler- rate; Fehlerrate tendenziell bei Pick-by-Projection am niedrigsten und bei Pick- by-Display am höchsten	-
Bannat 2014 (Deutschland)	16 (k. A.; 18 - 25), k. A.	Papierliste, di- gitale Liste (GUI)	Labor (Montage)	Montageaufga- ben (Crash- Bobby und Fi- schertechnik- Auto)	k. A.	-	-	-	Bevorzugung der digitalen Liste (mittels eigenem Fra- gebogen und Abwandlung der SUS)
Blattgerste et al. 2017 (Deutschland)	24 (23,6 \pm 2,9; 20 - 33), 8	AR-basierte In- situ-Assistenz (HoloLens, Smartphone), bildliche Anwei- sungen mittels Epson Moverio BT-200 Smart- Brille, Pa- pieranweisung	Labor (Montage)	Montageaufga- ben (LEGO)	k. A.	-	am geringsten bei der Pa- pieranweisung (mittels NASA-TLX)	schnellste Aufgabenerledi- gung mit Papierliste, we- nigste Fehler mit AR-Unter- stützung durch HoloLens	Bevorzugung der Papierliste

Autoren Jahr (Land)	Stichprobe Anzahl der Pro- banden (n), (MW Alter in Jahren \pm SD; Min - Max), An- zahl ♀	Assistenz- technologie	Untersu- chungssetting (angestrebte Anwendung)	Test / Kondition	Testdauer (TD) (alternativ: Ver- suchsdauer (VD))	Outcome-Parameter			
						Objektive Beanspruchung	Subjektive Beanspruchung	Objektive Leistung	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz
Böckelmann et al. 2015 (Deutschland)	25 (25,5 \pm 4,0; k. A.), 21	2 AR-HMDs (Nomad und LitEye), ohne HMD	Labor (manuelle Fertigung)	TAP-Test „Ge- sichtsfeld- /Neglect-Test“ und Test zur Aufmerksam- keitsverschie- bung	TD: 3-mal je 10 min.	keine signifikanten Unter- schiede (ermittelt durch HR und HRV), Funktionen der visuell- räumlichen Aufmerksam- keitsverschiebung mit HMD-Gerät vergleichbar, durch Verdeckung: Beein- trächtigung bestimmter Ge- sichtsfeldpositionen bei Li- tEye (mittels TAP-Test)	-	Leistungsdaten in beiden Versuchen mit HMD-Gerät vergleichbar (mittels TAP- Test „Gesichtsfeld- /Neglect“)	-
Bosch et al. 2017 (Niederlande)	35 (40,2 \pm 10,1; k. A.), 18	elektronische Anweisung, projizierte AR- Anweisungen mit virtueller Pick-to-Light- Unterstützung	Labor (Montage)	Montageaufga- ben	k. A.	-	geringer bei AR-Projektio- nen (mittels NASA-TLX)	bessere Produktivität und Qualität mit AR-Projektionen	-
Büttner et al. 2016 (Deutschland)	13 (25,8 \pm 6,6; 21 - 46), 1	In-Situ Projek- tion (Spa- tial/räumliche AR), Papier- liste, HMD	Labor (Montage)	Legoaufgaben (Löwe, Eisbär, Eule)	TD: ca. 15 min.	-	-	weniger Fehler und schnel- lere Aufgabenzeiten bei Papierliste und in In-Situ Projektion verglichen mit HMD	Bevorzugung der Papieran- leitung und In-situ Projek- tion hinsichtlich Benutzer- freundlichkeit und Nützlich- keit gegenüber HMD (mit- tels eigener Fragebögen und Interviews)
Funk et al. 2015 (Deutschland)	16 (24,8 \pm 5,4; 20 - 43), 4	“OrderPickAR” (camera-pro- jector cart) vs. Pick-by-Vision (HMD), Pick- by-Voice und Pick-by-Paper	Labor (Kommissionie- rung)	Kommissionie- rung	VD: 60 min.	-	bei Pick-by-Vision (HMD) am höchsten, bei Order- PickAR am geringsten (mittels NASA-TLX)	längste Durchführungszeit und am meisten Fehler bei Pick-by-Vision (HMD), ge- ringste Durchführungszeit bei OrderPickAR, geringste Fehlerzahl bei Order- PickAR und Pick-by-Paper	Bevorzugung von Order- PickAR; Bemängelung des HMD (v.a. durch Beein- trächtigung der Kommuni- kation untereinander) (er- mittelt durch qualitative Aussagen)
Funk et al. 2018 (Deutschland)	49 (27,4 \pm k. A.; 21 - 55), 14	statischer 60 Zoll Statusmo- nitor, mobile Smartwatch	Labor (Montage, Automobilin- dustrie)	manuelle Mon- tage	-	-	-	keine signifikanten Unter- schiede	keine negativen Akzeptanz- effekte durch die Smart- watch, bessere Bewertung der Smartwatch hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Vertrauen, Präferenz für Smartwatch (mittels UEQ)

Autoren Jahr (Land)	Stichprobe Anzahl der Pro- banden (n), (MW Alter in Jahren \pm SD; Min - Max), An- zahl ♀	Assistenz- technologie	Untersu- chungssetting (angestrebte Anwendung)	Test / Kondition	Testdauer (TD) (alternativ: Ver- suchsdauer (VD))	Outcome-Parameter			
						Objektive Beanspruchung	Subjektive Beanspruchung	Objektive Leistung	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz
Gao et al. 2019 (China)	18 (25,1 \pm 1,5; 23 - 29), 9	Betrachtung virtueller Objek- tive durch OST (Optical-See- Through)-HMD vs. Betrachtung realer Objekte	Labor (variabel)	Betrachtung von virtuellen bzw. realen Objekten (7 Durchgänge; verschiedenfar- bige Flächen eines Zauber- würfels zählen)	TD: 10 min.	stärkere visuelle (mittels EOG) und psychophysiolo- gische (mittels HRV) Bean- spruchung bei OST-HMD	stärkere subjektive Bean- spruchung bei OST-HMD (mittels eigenem Fragebö- gen)	-	-
Gerpott & Kurt 2020 (Deutschland)	55 (30,1 \pm k. A.; 18 - 66), 26	Pick-by-Watch (PbW), Pick-by- Paper (PbP)	Labor (Kommissionie- rung)	Kommissio- nieraufgaben	VD: 60 min.	-	geringer bei PbW als bei PbP	PbW langsamer als PbP, Fehlerrate ähnlich	-
Grubert et al. 2010 (Deutschland)	19 (26,5 \pm 3,8; k. A.), 2	AR-Anweisung, Papiermanual	Labor (Kommissionie- rung)	Kommissio- nieraufgaben	TD: 4 h	keine signifikanten Unter- schiede (mittels HRV)	9 von 19 Teilnehmer gaben eine erhöhte visuelle Ermü- dung nach Benutzung der AR-Brille an (mittels Be- schwerdefragebogen)	signifikant mehr Teile mit einer AR-Brille gesammelt und signifikant weniger Fehler verglichen mit einer Papieranweisung	-
Guo et al. 2014 (USA)	8 (k. A.; 22 - 27), 3	Head-up-Dis- play (HUD); auf einem Wagen montiertes Dis- play (CMD); Pick-by-Light; Papierliste	Labor (Kommissionie- rung)	Kommissionie- rung	k. A.	-	HUD und CMD weniger be- anspruchend als Pick-by- Light und Papierliste (mit- tels NASA-TLX)	HUD und CMD schneller und weniger Fehler als Pick-by-Light und Papier- liste	HMD ist präferiertes Sys- tem, danach CMD, Pick-by- Light, Papierliste (eigenes Bewertungsschema)
Henderson & Feiner 2011 (USA)	22 (26,3 \pm k. A.; 18 - 44.), 6	AR-Brille, LC- Display	Labor (Montage, War- tung und In- standhaltung)	manuelle Teil- montage einer Flugzeugtur- bine	VD: 50 min.	-	-	Bearbeitungszeit mit AR- Brille 47 % kürzer als mit LC-Display. Genauigkeit der Teile mit AR-Brille um 34 % besser als mit LC- Display	AR-Brille signifikant hilfrei- cher, zufriedenstellender und intuitiver zu bedienen (eigener qualitativer Frage- bogen)
Hou et al. 2013 (Australien)	20 (k. A.; k. A.)	Spatial AR, Pa- pieranweisung	Labor (Montage)	Montageauf- gabe mit LEGO-Baustei- nen	TD: ca. 20 min.	-	signifikant geringer bei AR- Anleitung (mittels NASA- TLX)	signifikant schneller und weniger Fehler mit AR-An- leitung	-

Autoren Jahr (Land)	Stichprobe Anzahl der Pro- banden (n), (MW Alter in Jahren \pm SD; Min - Max), An- zahl ♀	Assistenz- technologie	Untersu- chungssetting (angestrebte Anwendung)	Test / Kondition	Testdauer (TD) (alternativ: Ver- suchsdauer (VD))	Outcome-Parameter			
						Objektive Beanspruchung	Subjektive Beanspruchung	Objektive Leistung	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz
Kampmeier et al. 2007 (Deutschland)	45 (24,3 \pm 3,6; 19 - 33), 11	Papierliste, AR- HMD (Laserretinaldisplay)	Labor (Montage, Kommissionie- rung, Automobilin- dustrie)	Kommissionie- rung, Bestü- ckung von Si- cherungskäs- ten, Montage von Modellen	TD: 7,5 h	keine Veränderung (mittels ophthalmologischer Para- meter und HRV)	keine signifikanten Unter- schiede, jedoch berichten 20 % beim HMD von Be- schwerden wie Augen- druck, verschwommene Sicht und Kopfschmerzen (mittels BMS)	keine signifikanten Unter- schiede in der Konzentra- tionsleistung (mittels d2- Test)	reduzierte Akzeptanz beim HMD aufgrund ergonomi- scher Defizite des HMDs (z. B. Gewicht, Kabellänge) (mittels eigener Befragung)
Kim et al. 2019 (USA)	16, 8 Männer (24,2 \pm 4,8; k. A.), 8 Frauen (22,5 \pm 2,7; k. A.)	zwei HMD-Ty- pen (monokular vs. binokular), Informations- darstellung (text- vs. grafik- basiert), Infor- mationsverfü- gbarkeit (immer vs. auf Abruf), Baseline: Pa- pierliste	Labor (Kommissie- rung & Monta- ge)	Kommissionie- ren und Monta- geaufgaben	TD: ca. 2 h	-	grafische Darstellung weni- ger beanspruchend als textbasierte; immer verfü- gbare Information weniger beanspruchend als auf Ab- ruf bereitgestellte (mittels NASA-TLX)	Bearbeitungszeit: mit grafik- basierter Informations- darstellung kürzer als mit textbasierter; mit immer verfügbaren Informationen kürzer als mit auf Abruf ver- fügbaren Informationen Fehlerrate: mit grafikbasier- ter Informationsdarstellung kleiner als mit textbasierter; kein Unterschied bei Bear- beitungszeit und Fehlerrate durch den HMD-Typ	kein klarer Favorit bei den HMD-Typen 75 % favorisierten grafikba- sierte Anleitung und immer verfügbare Informationen (mittels UEQ, eigener Be- fragung)
Kim & Lee 2011 (Südkorea)	5 (k. A.; 22 - 24), 2	2D vs. 3D-In- halten auf Dis- play	Labor (variabel)	Anschauen von Videoclips	TD: zweimal je 15 min.	objektive visuelle Ermü- dung bei 3D-Inhalten höher als bei 2D-Inhalten (mittels EEG)	subjektive visuelle Ermü- dung bei 3D-Inhalten höher als bei 2D-Inhalten (mittels eigener Fragen)	-	-
Kretschmer et al. 2018 (Deutschland)	24 (k. A.; k. A.), 9	PC-basiertes Verpackungs- training	DB Schenker, Leipzig (Intralogistik)	Verpackungs- arbeit	variabel	-	insgesamt moderate sub- jektive Beanspruchung, zeitliche und geistige Bean- spruchung am höchsten (mittels NASA-TLX)	-	gute Usability (61,4 Punkte, mittels SUS)
Kretschmer & Terharen 2019 (Deutschland)	30 (25,5 \pm 2,2; 19 - 29), 15	VR-Training als Serious Game für Intralogistik	Labor (Intralogistik)	Verpackungs- arbeit	k. A.	-	moderate Beanspruchung (mittels Raw-NASA-TLX)	-	intrinsische Motivation kor- reliert positiv mit der Usabi- lity und der User Experi- ence (ermittelt durch UEQ), gute Usability (71,81 Punkte, mittels SUS)

Autoren Jahr (Land)	Stichprobe Anzahl der Pro- banden (n), (MW Alter in Jahren \pm SD; Min - Max), An- zahl ♀	Assistenz- technologie	Untersu- chungssetting (angestrebte Anwendung)	Test / Kondition	Testdauer (TD) (alternativ: Ver- suchsdauer (VD))	Outcome-Parameter			
						Objektive Beanspruchung	Subjektive Beanspruchung	Objektive Leistung	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz
Müller et al. 2018 (Deutschland)	25 (34 \pm k. A.; k. A.), 7	Smartwatch, Gestensteue- rung, Sprachsteue- rung, Infrarot- Fernbedienung	Labor (Montage)	7-teiliges LEGO-Puzzle	k. A.	-	-	längste Zeit und meiste Fehler mit Gestensteue- rung, am schnellsten IR- Fernbedienung	beste Bewertung der Sprachsteuerung, schlech- teste Bewertung der Ges- tensteuerung (mittels SUS)
Oehme 2004 (Deutschland)	25 (36,9 \pm 8,26; 21 - 54), 0	drei HMDs, La- serretinaldis- play	Labor (Produktion und Service)	visuelle Such- aufgabe	k. A.	keine signifikanten Unter- schiede (mittels Herzfre- quenzarrhythmie)	keine signifikanten Unter- schiede (mittels eigener Skalen)	bessere Leistung bei La- serretinaldisplay	-
Pfendler et al. 2005 (Deutschland)	12 (k. A.; 20 - 55), 5	HMD, Hand- held-Display	Labor (variabel)	Zielerken- nungsaufgabe	TD: 2 h	-	höher bei HMD, hier auch verstärkt Symptome wie Er- müdung, Anstrengung der Augen, Druckgefühl im Kopfbereich und Schwierig- keiten scharf zu sehen	keine signifikanten Unter- schiede, tendenziell bes- sere Leistung bei Hand- held-Display	-
Pringle et al. 2018 (Irland)	36 (22,4 \pm 5,5; k. A.), 0	AR-HMD, Tablet	Labor (Industrie)	Wartung eines Giermotors	TD: 20 min. VD: 1 h	-	höhere kognitive Beanspru- chung bei Tablet, höhere physische Beanspruchung bei AR-HMD (Gewicht) (mittels NASA-TLX)	bessere Genauigkeit mit AR-HMD als mit Tablet, schlechtere Geschwindig- keit mit AR-HMD als mit Tablet	bessere Bewertung des AR-HMDs (mittels SUS)
Schega et al. 2011 (Deutschland)	10 (27,7 \pm 3,2; k. A.), 0	zwei HMDs, Papierliste	Labor (Kommissionie- rung)	Kommissionie- ren	TD: 2 h	kein signifikanter Unter- schied (mittels HRV)	kein signifikanter Unter- schied (mittels EZ-Skala und BSF)	weniger erledigte Jobs mit den HMDs als bei Papier- liste, weniger Fehler mit den HMDs als mit der Pa- pierliste	-
Schuh et al. 2017 (Deutschland)	24 (22,2 \pm k. A.; k. A.), 3	digitale Monta- geanweisung, Papieranwei- sung	Labor (Montage)	Montage eines Stiftehalters	TD: ca. 1 h	-	-	Produktivität und Qualität bei digitaler Anweisung besser, Lerneffekt bei Pa- pierliste besser	-
Stockinger et al. 2020 (Deutschland)	31 (22,9 \pm 1,45; k. A.), k. A.	Pick-by-Light, Pick-by-Paper	Labor (Kommissionie- rung)	Kommissio- nieraufgaben	VD: 90 min.	höher bei Pick-by-Light (mittels Herzschlagfre- quenz)	höher bei Pick-by-Paper (mittels NASA-TLX)	-	-

Autoren Jahr (Land)	Stichprobe Anzahl der Probanden (n), (MW Alter in Jahren \pm SD; Min - Max), Anzahl ♀	Assistenz- technologie	Untersuchungssetting (angestrebte Anwendung)	Test / Kondition	Testdauer (TD) (alternativ: Versuchsdauer (VD))	Outcome-Parameter			
						Objektive Beanspruchung	Subjektive Beanspruchung	Objektive Leistung	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz
Tang et al. 2003 (USA)	75 (21 \pm k. A.; k. A.), 21	Papierinstruktion, computergestützte Anleitung durch LCD-Monitor, computergestützte Anleitung durch HMD, räumlicher Überlagerung durch AR	Labor (Montage)	Montageaufgabe mit Duplo-Steinen	TD: ca. 45 min.	-	bei AR-Überlagerung am geringsten, bei Papierinstruktion am höchsten (mittels NASA-TLX)	schnellste Zeit und geringste Fehler mit AR-Überlagerung, längste Zeit mit Papierinstruktion, meiste Fehler mit computergestützte Anleitung durch HMD	-
Tümler 2009 (Deutschland) [auch Tümler et al. 2008a; Tümler et al. 2008b]	20 (25,9 \pm 2,8; k. A.), 0	AR-gestützte Tätigkeit (Microvision Nomad ND2100; HMD) vs. nicht-AR-gestützte Tätigkeit (Papierliste)	Labor (Kommissionierung)	Kommissionieraufgaben	TD: 2 h	keine Unterschiede zwischen HMD und Papierliste, SDNN zeigte eine höhere Belastung der Probanden beim Gebrauch der AR-Brille zu Beginn der Aufgabe. Dieser Unterschied verschwand im Laufe der Aufgabe (mittels HRV)	Hinweise auf erhöhte visuelle Beanspruchung durch AR (Augenbrennen, Augenermüdung), Motivations- und Beanspruchungslage bei Papierliste und HMD ähnlich (mittels Befindlichkeitsskala, Beschwerdefragebogen, EZ-Skala)	weniger Fehler mit dem AR-System als mit der Papierliste, aber AR-HMD 30 % langsamer als die Papierliste (Mögliche Gründe: unpräzise Kalibrierung, fehlender Komfort)	Mängel: Interaktion, Systemgeschwindigkeit, Überlagerungsgenauigkeit und Ergonomie des HMDs (mittels qualitativer Aussagen)
Ullmann 2006; Braun et al. 2005 (Deutschland)	31 (k. A.), k. A.	AR-HMD	Feldversuch LKW-Montagewerk Wörth der DaimlerChrysler AG (Kommissionierung)	Kommissionieren im Rahmen der Arbeitsaufgabe	TD: 8 h (Test über 4 Wochen)	keine Veränderungen am Sehapparat, keine physiologischen Korrelate zu subjektivem Empfinden	deutliche Verschlechterung der subjektiven Beanspruchung (z. B. Kopfschmerzen, Nachbilder, Schwindelgefühl), ergonomische Defizite (HMD-Gewicht, Hautirritationen durch Wärmeentwicklung)	-	entscheidende Faktoren: wahrgenommene Nützlichkeit, Ökonomie, Belastung und Beanspruchung, nachhaltige Gesundheit, Handhabbarkeit, Rahmenbedingungen und soziale Faktoren am Arbeitsplatz (mittels Interviews angelehnt an TAM)

Autoren Jahr (Land)	Stichprobe Anzahl der Pro- banden (n), (MW Alter in Jahren \pm SD; Min - Max), An- zahl ♀	Assistenz- technologie	Untersuchungssetting (angestrebte Anwendung)	Test / Kondition	Testdauer (TD) (alternativ: Ver- suchsdauer (VD))	Outcome-Parameter			
						Objektive Beanspruchung	Subjektive Beanspruchung	Objektive Leistung	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz
Werrlich et al. 2018 (Deutschland)	30 (Gruppe 1: 18,7 \pm 2,3; 16 - 22; Gruppe 2: 18,2 \pm 2,4; 15 - 25), 3	HMD-basier- ens Montage- training (Gruppe 1), pa- pierbasiertes Montagetrai- ning (Gruppe 2)	Labor der BMW AG (Montagetrai- ning)	Montagetrai- ning	TD HMD: 2 h; TD Papier: 1 h	-	zeitliche Beanspruchung und Frustration bei Gruppe 2 höher als bei Gruppe 1 (mittels NASA-TLX)	Gruppe 2 signifikant schneller, jedoch mehr Fehler	Benutzerfreundlichkeit (mit- tels SUS) und hedonische und pragmatische Qualität (mittels UEQ) bei Gruppe 1 besser
Wille 2016 (Deutschland) Laborstudie	41 (k. A.; 18 - 67), 21	HMD (MA- VUS), Table- PC	Labor (variabel)	Montageauf- gabe mit paral- leler Monito- ringaufgabe	TD: 4 h	keine signifikanten Unter- schiede (mittels HR und HRV)	teils höhere subjektive visu- elle Beanspruchung (mit- tels VFQ) und höhere sub- jektive Beanspruchung bei HMD als bei Tablet-PC (mittels RSME und NASA- TLX)	längere Durchführungszeit mit HMD als mit Tablet-PC	mangelnder Tragekomfort beim HMD (Gewicht, Kabel (mittels qualitativer Inter- view)
Wille 2016 (Deutschland) Replikations- studie	37 (HMD-Gruppe n=20, 37,3 \pm 13,8; k. A., 12), Tablet-Gruppe n=17, 37,1 \pm 16,0; k. A., 7)	HMD (Google Glass), Table- PC	Labor (variabel)	Montage eines Spielzeugautos	TD: 30 min. Tragedauer HMD: 2 h	-	teils höhere subjektive visu- elle Beanspruchung bei HMD als bei Tablet-PC, je- doch auf geringem Niveau (mittels VFQ), signifikant höhere Bean- spruchung bei HMD als bei Tablet-PC (mittels NASA- TLX), keine Unterschiede durch RSME	längere Durchführungszeit mit HMD als mit Tablet-PC	90 % waren mit dem Tra- gekomfort des HMDs zu- frieden (mittels Interview)
Wu et al. 2015 (USA)	8 (23,5 \pm k. A.; 22 - 27), 2	Pick-by-Light, Pick-by-HUD	Labor (Kommissie- rung)	Kommissio- nieraufgaben	k. A.	-	geringer mit Pick-by-HUD verglichen mit Pick-by-Light (mittels NASA-TLX)	Pick-by-Light bis zu 50 % langsamer als Pick-by- HUD, keine Unterschiede in der Fehlerrate	Favorit: Pick-by-HUD (mit- tels eigenem Ranking)
Wu et al. 2016 (USA)	12 (24,2 \pm k. A.; 20 - 33), 4	Papierliste, Pick-by-Light, Pick-by-HUD, Kombination von Pick-by- Light und Pick- by-HUD	Labor (Kommissie- rung)	Kommissio- nieraufgaben	k. A.	-	bei Kombination von HUD und Pick-by-Light und allei- niges Pick-By-Light am ge- ringsten, bei Papierliste am höchsten (mittels NASA- TLX)	kürzeste Durchführungszeit und geringste Fehlerzahl bei Kombination von Pick- by-Light und Pick-by-HUD, längste Zeit und höchste Fehlerzahl bei Papierliste	Favorit: Kombination von HUD und Pick-by-Light (mittels eigenem Ranking)

k. A.: keine Angabe in der Studie; -: Outcome-Parameter wurde nicht untersucht

Auf Grundlage der systematischen und selektiven Literaturrecherchen lässt sich festhalten, dass die Bestimmung eines einheitlichen Trends hinsichtlich nutzerbezogener Aspekte kaum möglich ist. Die Vermutung liegt nahe, dass die nutzerbezogenen Aspekte stark von der spezifischen Hard- und Softwaregestaltung im jeweiligen Versuch abhängen. Insbesondere die rasante technologische Entwicklung erschwert zusätzlich einen Vergleich verschiedener Assistenzsysteme miteinander. Hinzu kommen Schwierigkeiten in der Technologiebezeichnung und -klassifikation (z. B. Pick-by-Light, Pick-to-Light, Pick-2-Light, P2L). Alleine ein HMD wird mitunter auch als HWD (Head-Worn-Display), HUD (Head-Up-Display), AR-Brille, VR-Brille oder Smartglass bezeichnet. Die Übergänge zwischen den Begriffen und Technologien sind fließend. Die Literaturrecherchen machen klar, dass insbesondere umfassende, mehrdimensionale arbeitsphysiologische Untersuchungen, die Durchführung von Pilotstudien, User-Tests in Feldversuchen und Erkenntnisse zum längerfristigen Einsatz von AR-Systemen und altersgemischte Probandengruppen fehlen. Die bisherigen Studien liefern weiterhin vorrangig Erkenntnisse zu Leistungsaspekten, wie Geschwindigkeit und Fehlerzahl. Zudem sind Fragebögen das am häufigsten verwendete Maß, um subjektive Bewertungen und Beanspruchungen zu erheben (v. a. NASA-TLX). Die subjektive Beanspruchung stellt jedoch nur eine Dimension der Beanspruchungslage des Nutzers dar (Fahrenberg 1969). Ebenso wichtig ist die Erfassung von physiologischen Beanspruchungen über validierte arbeitsphysiologische Methoden und die Beachtung aller Ebenen des psychophysiologischen Ansatzes, um einen umfassenden Blick auf die Beanspruchungslage der zukünftigen Nutzer zu bekommen (vgl. auch Gerpott & Kurt 2020). Ein Mixed-Methods-Ansatz wird in dieser Dissertation daher angestrebt, um nutzerbezogene Aspekte ganzheitlich zu erfassen.

Mit der vorliegenden Arbeit soll daher in iterativer Vorgehensweise durch aufeinander aufbauende Teilstudien, die stetig realistischer im Sinne des angestrebten Arbeitskontextes werden, die beschriebene Forschungslücke gefüllt werden.

1.3 *Arbeitshypothesen*

Aus der Literaturrecherche lassen sich verschiedene Hypothesen und Fragestellungen ableiten, die im Rahmen einer Vorstudie und zwei User-Tests bearbeitet werden. Die Ziele bzw. die Fragestellungen sowie die formulierten Arbeitshypothesen werden in den folgenden Abschnitten systematisch zu jeder Studie dargestellt.

1.3.1 Vorstudie

Die Vorstudie hat zum Ziel, die arbeitsphysiologischen Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bei digitalen Assistenzsystemen für Folgeuntersuchungen zu testen. Zudem werden die jeweiligen Beanspruchungsreaktionen vor und nach den Montagedurchläufen und die objektiven Leistungsdaten analysiert. Da in der manuellen Montage bisher vorrangig papierbasierte und teilweise digitale, nicht-interaktive Anleitungen verwendet werden (Jeske et al. 2011; Bannat 2014; Lichtblau et al. 2018), werden für die Vorstudie eine Papierliste und eine digitale Liste mittels Laptop vergleichend ausgewertet.

Es werden Arbeitshypothesen auf Grundlage des aktuellen Forschungsstandes aufgestellt, die im Anschluss überprüft werden. Sie gliedern sich in Haupthypothesen, die sich auf den Vergleich der beiden Systemvarianten beziehen, und Nebenhypothesen, die Vergleiche im zeitlichen Verlauf und zur Ausgangslage anstellen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Arbeitshypothesen der Vorstudie

Hauptthesen		Nebenthypothesen	
Themenkomplex zur psychophysiologischen Beanspruchung			
I-H1	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung bei der Arbeit mit der digitalen Liste unterscheidet sich nicht im Vergleich zur Papierliste.</i>	I-H1a	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung ist während der Montageaufgaben höher als in der Ruhephase. Dies gilt für beide Varianten.</i>
		I-H1b	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung sinkt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.</i>
I-H2	<i>Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist bei der Arbeit mit der digitalen Liste geringer als bei der Arbeit mit der Papierliste.</i>	I-H2a	<i>Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist nach den Montageaufgaben höher als vor dem Versuch. Dies gilt für beide Varianten.</i>
		I-H2b	<i>Die subjektive (visuelle) Beanspruchung steigt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.</i>
Themenkomplex zur objektiven Leistung			
I-H3	<i>Die objektiven Leistungsdaten sind bei der Arbeit mit der digitalen Liste besser als bei der Arbeit mit der Papierliste.</i>	I-H3a	<i>Die objektiven Leistungsdaten sind bei den Montageaufgaben besser als vor dem Versuch. Dies gilt für beide Varianten.</i>
		I-H3b	<i>Die objektiven Leistungsdaten verbessern sich im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.</i>
Themenkomplex zur Usability			
I-H4	<i>Die Gebrauchstauglichkeit wird bei der digitalen Liste ähnlich eingeschätzt wie bei der Papierliste.</i>		

Hauptthesen		Nebenthesen	
Themenkomplex zu Korrelationsverbindungen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg			
I-H5	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Ebenen des modifizierten psychophysiologischen Ansatzes nach Fahrenberg (1969).</i>	I-H5a	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven (visuellen) Beanspruchung bei der jeweiligen Variante.</i>
		I-H5b	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.</i>
		I-H5c	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.</i>
		I-H5d	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit bei der jeweiligen Variante.</i>
		I-H5e	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit bei der jeweiligen Variante.</i>
		I-H5f	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen den objektiven Leistungsdaten und der Gebrauchstauglichkeit bei der jeweiligen Variante.</i>
		I-H5g	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen den verschiedenen subjektiven (visuellen) Beanspruchungsparametern bei der jeweiligen Variante.</i>

1.3.2 User-Test (VR)

In Abschnitt 1.2.5 wurde erläutert, dass eine nutzerzentrierte Gestaltung und Evaluation wichtige Voraussetzungen sind, um Systeme zu entwickeln, die dem späteren Nutzer tatsächlich helfen und von ihm akzeptiert werden. Zur nutzerzentrierten Evaluation von digitalen Assistenzsystemen können Methoden des Usability Engineerings eingesetzt werden. User-Tests sollen die Benutzbarkeit und Benutzerfreundlichkeit neuer Technologien sicherstellen (Oehme et al. 2002). Der User-Test in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner LIVING SOLIDS GmbH hat zum Ziel, am Anwendungsfall von Parker zwei mögliche Assistenzvarianten zu testen und damit schrittweise weiterzuentwickeln, um einen beanspruchungsoptimalen Umgang zu sichern. Da die Entwicklung des Assistenzsystems zum geplanten Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht abgeschlossen ist, werden zwei mögliche Assistenzmodule (AR-Konturen und Pick-to-Light-System (PtL)) mithilfe einer marktüblichen VR-Brille (HTV Vive) (Fa. High Tech Computer Corporation, Taoyuan, Taiwan) simuliert.

Es werden die in Tabelle 6 aufgeführten Arbeitshypothesen aufgestellt.

Tabelle 6: Arbeitshypothesen des User-Tests (VR)

Hauptthesen		Nebenthesen	
Themenkomplex zur psychophysiologischen Beanspruchung			
II-H1	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung bei der Arbeit mit den AR-Konturen unterscheidet sich nicht im Vergleich zum Pick-to-Light-System.</i>	II-H1a	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung ist während der Montageaufgaben höher als in der Ruhephase. Dies gilt für beide Varianten.</i>
		II-H1b	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung sinkt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.</i>
		II-H1c	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung unterscheidet sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.</i>
		II-H1d	<i>Das alleinige Tragen der VR-Brille ruft eine höhere objektive physiologische Beanspruchung hervor.</i>
II-H2	<i>Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist bei der Arbeit mit den AR-Konturen geringer als bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System.</i>	II-H2a	<i>Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist nach den Montageaufgaben höher als vor dem Versuch. Dies gilt für beide Varianten.</i>
		II-H2b	<i>Die subjektive (visuelle) Beanspruchung sinkt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.</i>
		II-H2c	<i>Die subjektive (visuelle) Beanspruchung unterscheidet sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.</i>
Themenkomplex zur objektiven Leistung			
II-H3	<i>Die objektiven Leistungsdaten sind bei der Arbeit mit den AR-Konturen besser als bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System.</i>	II-H3a	<i>Die objektiven Leistungsdaten verbessern sich im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.</i>
		II-H3b	<i>Die objektiven Leistungsdaten unterscheiden sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.</i>
Themenkomplex zur Usability und Nutzerakzeptanz			
II-H4	<i>Die Gebrauchstauglichkeit und Nutzerakzeptanz werden bei den AR-Konturen besser eingeschätzt als bei dem Pick-to-Light-System.</i>	II-H4a	<i>Die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit und Nutzerakzeptanz unterscheiden sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.</i>
Themenkomplex zu Korrelationsverbindungen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg			
II-H5	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Ebenen des modifizierten psychophysiologischen Ansatzes nach Fahrenberg (1969).</i>	II-H5a	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven (visuellen) Beanspruchung bei der jeweiligen Variante.</i>
		II-H5b	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.</i>

Hauptthesen		Nebenthesen	
		II-H5c	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.</i>
		II-H5d	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit / Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.</i>
		II-H5e	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit / Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.</i>
		II-H5f	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen den objektiven Leistungsdaten und der Gebrauchstauglichkeit / Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.</i>
		II-H5g	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen den verschiedenen subjektiven (visuellen) Beanspruchungsparametern bei der jeweiligen Variante.</i>
		II-H5h	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern zur Usability und Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.</i>

1.3.3 User-Test (Real)

Der User-Test in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Fraunhofer IFF hat zum Ziel, am Anwendungsfall von Parker das im Verbundprojekt entwickelte sensorbasierte Assistenzsystem qualitativ zu testen und damit schrittweise weiterzuentwickeln, um einen beanspruchungsoptimalen Umgang zu sichern. Das Assistenzsystem existiert zum Zeitpunkt der Studiendurchführung als Prototyp an einem Modellarbeitsplatz des Fraunhofer IFF. Vorrangig wird die Usability des Assistenzsystems ermittelt. Die Beurteilung der Usability und Nutzerakzeptanz erfolgt in einer qualitativen offenen Herangehensweise. Daher werden in diesem Zusammenhang keine Hypothesen, sondern Fragestellungen formuliert. Bei den Themenkomplexen zur psychophysiologischen Beanspruchung und zu den Korrelationsverbindungen werden die Hypothesen in Tabelle 7 aufgestellt.

Tabelle 7: Arbeitshypothesen des User-Tests (Real)

Hauptthesen		Nebenthesen	
Themenkomplex zur psychophysiologischen Beanspruchung			
		III-H1a	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung ist während der Montage höher als in der Ruhephase.</i>
		III-H1b	<i>Die objektive physiologische Beanspruchung bei der realen Montage ist geringer im Vergleich zur virtuellen Montage.</i>
		III-H2a	<i>Die subjektive Beanspruchung bei der realen Montage ist geringer im Vergleich zur virtuellen Montage.</i>
Themenkomplex zur Usability und Nutzerakzeptanz			
III-F1	<i>Wie bewerten die Probanden die einzelnen Komponenten des Assistenzsystems hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit?</i>		
Themenkomplex zu Korrelationsverbindungen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg			
III-H3	<i>Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven Beanspruchung.</i>		

2 Material und Methoden

Nachdem im folgenden Unterkapitel der allgemeine Studienaufbau der vorliegenden Arbeit dargestellt wurde, werden in den Abschnitten der Unterkapitel 2.2, 2.3 und 2.4 Angaben zu den Probanden, der Methodik und dem Studienablauf der jeweiligen Teilstudie gemacht.

Kapitel 2 schließt mit der Beschreibung der statistischen Auswertung ab.

2.1 Studiendesign

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit (Gesamtstudie) werden drei aufeinander aufbauende experimentelle Teilstudien geplant und durchgeführt (vgl. Abbildung 16).

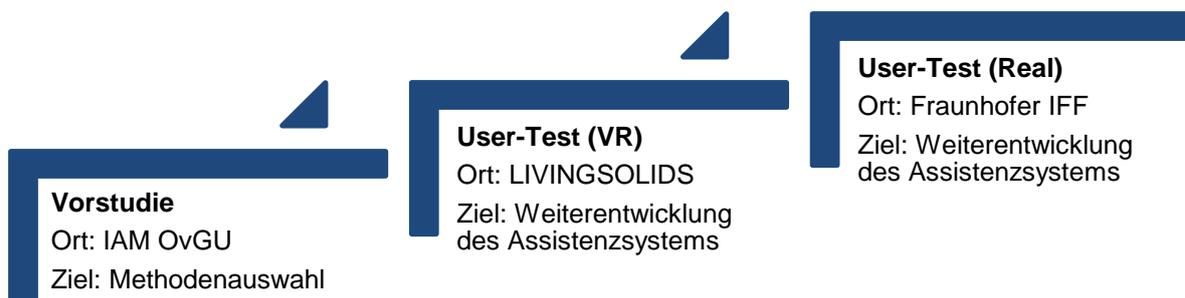


Abbildung 16: Design der Gesamtstudie

Vorstudie und User-Test (VR) werden als Crossover-Studien designt, da dieses Studiendesign mit weniger Probanden auskommt, um eine Varianzreduktion zu erreichen.

Dabei werden die Methoden der einzelnen Untersuchungen, angelehnt an das psychophysiologische Mehrebenenkonzept von Fahrenberg (1969), ausgewählt und eingesetzt (vgl. Abbildung 17), um den komplexen Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf den Nutzer gerecht zu werden. Das klassische Modell wird um die Ebene der Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit durch den Probanden ergänzt.

Im Sinne des integrierten Belastungs-Beanspruchungs-Konzeptes (vgl. Abbildung 15 in Abschnitt 1.2.6) sind bei den Belastungsfaktoren insbesondere die Montageaufträge als Arbeitsaufgaben und das Assistenzsystem als Arbeitsmittel bedeutsam. In der Kategorie der Inanspruchnahme werden die individuellen Voraussetzungen der Probanden erfasst, indem u. a. soziodemografische Angaben und Vorerfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen erfasst und die aktuelle psychische und physische Erfassung erhoben wird. Es werden kurzfristige Beanspruchungsfolgen betrachtet.

Die Gesamtstudie verfolgt ein vorrangig quantitatives Vorgehen, welches mit qualitativen Methoden in den User-Tests ergänzt wird. Damit verfolgt diese Dissertationsschrift einen Mixed-Methods-Ansatz.

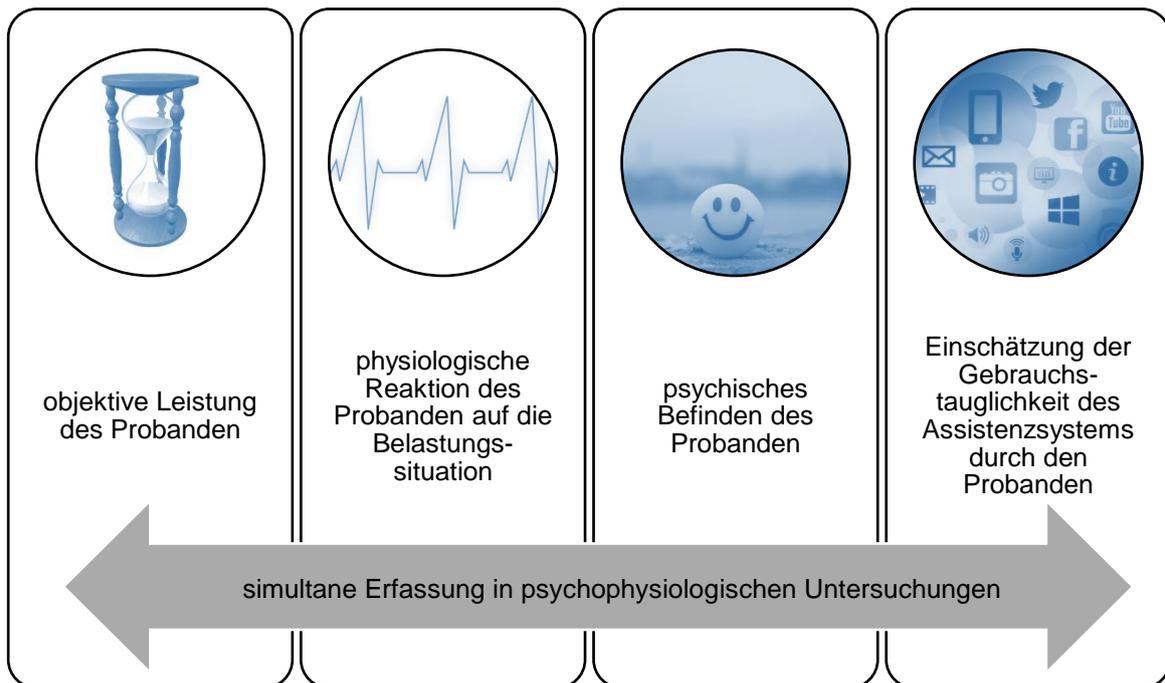


Abbildung 17: Psychophysiologisches Mehrebenenkonzept (mod. nach Fahrenberg 1969)

Der Bereich Arbeitsmedizin der Otto-von-Guericke-Universität (OvGU) Magdeburg stellte nach der Phase der ersten Literaturrecherche im November 2017 einen Antrag an die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der OvGU Magdeburg auf Zustimmung zur Studiendurchführung. Dem Antrag folgte eine zustimmende Bewertung der zuständigen Kommission (185/17) (vgl. A2: Votum der Ethikkommission).

2.2 Vorstudie

Die Vorstudie hat, wie in Abschnitt 1.3.1 beschrieben, zum Ziel, die arbeitsphysiologischen Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bei digitalen Assistenzsystemen für Folgeuntersuchungen zu testen. Zudem werden die jeweiligen Beanspruchungsreaktionen bei einer Papierliste und einer digitalen Liste und die objektiven Leistungsdaten bei der Verwendung einer Papierliste und digitalen Liste analysiert. Ergänzend wird die wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit der herkömmlichen und digitalen Arbeitsanweisung erfasst.

2.2.1 Probanden

Die Probandenakquise erfolgt über verschiedene Wege, zu denen zählen unter anderem

- Aushänge in den universitären Einrichtungen (z. B. Mensa, Bibliothek, Sporthalle) (vgl. A3: Probandenaushang zur Vorstudie),
- E-Mail-Verteiler der Psychologiestudierenden,
- DSB (Das schwarze Brett) Anzeigen in Magdeburg,

- Das schwarze Brett der Universitätsmedizin (online),
- ebay-Kleinanzeigen und
- persönliche Ansprache (z. B. Studierende der Hochschule Magdeburg-Stendal).

Für die Vorstudie sollen 20 bis 25 männliche und weibliche Probanden im erwerbsfähigen Alter akquiriert werden. Personen, die einen Visus (cc) unter 0,63 aufweisen, unter einer Stoffwechselerkrankung, z. B. Diabetes, oder Herzrhythmusstörungen leiden sowie bestimmte Medikamente (wie β -Blocker) einnehmen, können aufgrund möglicher Verzerrungen der HRV-Daten (Sammito et al. 2016) nicht an der Studie teilnehmen bzw. wurden danach aus der Bewertung ausgeschlossen.

2.2.2 Methodik

Angelehnt an das psychophysiologische Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg (1969) können die eingesetzten Methoden aller drei experimentellen Studien mit den drei Ebenen objektive physiologische Beanspruchungsparameter, subjektive Beanspruchungsparameter und objektive Leistungsparameter verknüpft werden. Zusätzlich wird die Usability erfasst. Bei der Auswahl der Methoden werden möglichst rückwirkungsarme Messinstrumente ausgewählt, damit diese keine zusätzliche Beanspruchung für die Probanden mit sich bringen.

Objektive physiologische Beanspruchungsparameter

Zur Messung der objektiven physiologischen Beanspruchung wird die HRV analysiert. Die HRV beschreibt die Variabilität der Herzschlagfolge, die Erkenntnisse über den allgemeinen Aktivierungszustand des Organismus und damit die Beanspruchungslage des Nutzers liefert (Böckelmann & Sammito 2016). Sie umfasst eine Vielzahl mathematisch berechneter Parameter, „*welche die Varianz, Rhythmik oder Komplexität einer Zeitreihe von aufeinander folgenden Herzaktionen – den sog. NN-Intervallen – kennzeichnet*“ (Sammito et al. 2015, S. 5). Diese werden international üblicherweise in zeitbezogene, frequenzbezogene und Parameter der nicht-linearen Analyse unterteilt. Analysen der zeitbezogenen Parameter können in statistische und geometrische Methoden unterteilt werden, bei der die NN-Intervalle mathematisch hinsichtlich ihrer Varianz ausgewertet werden. Im Frequenzbereich werden die (nicht)rhythmischen Schwankungen der NN-Intervallreihen mithilfe einer Spektralanalyse in frequenzabhängige Oszillationen übertragen. Am weitesten verbreitet sind die Fast Fourier-Transformation und die Autoregression. In dieser Arbeit wird für die Berechnung der Spektren die Autoregression angewendet, da sie in kurzen Zeitintervallen robuster ist als die Fast Fourier-Transformation (Berntson et al. 1997; Hoos 2006; Sammito & Böckelmann 2015). Die nicht-linearen Parameter spiegeln, anders als die Analysen des Zeit- und Frequenzbereichs, nicht die Stärke der HRV wider, sondern erfassen qualitative Aspekte der NN-Reihe. Die Methoden werden als

robust gegen Artefakte eingeschätzt und sind sowohl für Langzeit- als auch Kurzaufzeichnungen geeignet. Ihre Darstellung erfolgt z. B. mithilfe eines Poitcaré-Plots (Sammito et al. 2016). Die HRV unterliegt verschiedenen endogenen und exogenen Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 18).



Abbildung 18: Einflussfaktoren auf die Herzratenvariabilität (mod. nach Sammito et al. 2015; Sammito & Böckelmann 2016; Sammito et al. 2016)

Als Datenbasis für die HRV-Analyse werden in der Vorstudie für die folgenden Phasen Zeitfenster von fünf bzw. 30 Minuten (bei den Montagedurchläufen) gewählt. Es werden stets Phasen gleicher Dauer verglichen (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Auswertungsphasen für die HRV-Analyse der Vorstudie

Ruhephase vorher (sitzen) (5 min.)	
1. Montagedurchlauf (30 min.) Mitte (5 min.)	Montage mit Papierliste (30 min.) Mitte (5 min.)
Freie Ruhephase	
2. Montagedurchlauf (30 min.) Mitte (5 min.)	Montage mit digitaler Liste (30 min.) Mitte (5 min.)

Die Daten werden mit dem Langzeit-EKG Rekorder medilog AR12plus (Fa. SCHILLER Medizintechnik GmbH, Baar, Schweiz) erfasst und mithilfe der Software medilog DARWIN2 (Fa. SCHILLER Medizintechnik GmbH, Baar, Schweiz) ausgelesen.

Klinische Auffälligkeiten und Artefakte im EKG werden durch medizinisches Fachpersonal kontrolliert und ggf. bereinigt. Anschließend erfolgt der Export der NN⁷-Intervall-Reihe für die weitere HRV-Analyse, die mithilfe der Software Kubios HRV Version 2.0 (Biosignal Analysis and

⁷ Hier und im Folgenden werden die NN-Intervalle betrachtet, die die Abstände zwischen den Normalschlägen betrachten. Extrasystolen werden ausgeschlossen.

Medical Imaging Group, Kuopio, Finland) durchgeführt wird. Nach nationalen und internationalen Empfehlungen (ESC & NASPE 1996; Sammito et al. 2015) erfolgt eine Artefaktkorrektur mit den Einstellungen custom und 0,3 ohne Veränderung der trend components. Für die Spektralanalyse wird ein autoregressives Modell mit einer Fensterbreite von 300 Sekunden und 50 % window overlap (Fensterüberlappung) für die 5-Minuten-Intervalle berechnet. Um die 30-minütigen Arbeitsphasen mit der Papier- und digitalen Liste vergleichen zu können, wird die Fensterbreite auf 1800 Sekunden angepasst.

Folgende HRV-Parameter werden verwendet:

zeitbezogene Parameter

- Mean NN [ms]: Mittelwert der NN-Intervalle
- SDNN [ms]: Standardabweichung der NN-Intervalle
- Mean HR [1/min]: Mittelwert der Herzschlagfrequenz
- SD HR [1/min]: Standardabweichung der Herzschlagfrequenz
- RMSSD [ms] (Root Mean Square of Successive Differences): Quadratwurzel des Mittelwertes der Summe aller Differenzen zwischen benachbarten NN-Abständen
- NN 50 [count]: Anzahl der aufeinanderfolgenden NN-Intervallpaare, die sich > 50 ms voneinander unterscheiden
- pNN 50 [%]: Prozentsatz aufeinander folgender NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen
- NN tri index⁸: Triangular Index; Integral der Dichteverteilung (Anzahl aller NN-Intervalle dividiert durch das Maximum (Höhe) der Dichteverteilung) bzw. Quotient aus der absoluten Anzahl der NN-Intervalle zur Anzahl der modalen NN-Intervalle
- TINN [ms]⁸: Grundlinienbreite des NN-Intervall-Histogramms

frequenzbezogene Parameter

- VLF-Peak [Hz]⁸: Very Low Frequency Peak: Frequenzgipfel im VLF-Band
- LF-Peak [Hz]: Low Frequency Peak: Frequenzgipfel im LF-Band; Baroreflex-Peak
- HF-Peak [Hz]: High Frequency Peak: Frequenzgipfel im HF-Band; Respiratorischer Peak
- VLF [ms²]⁸: Very Low Frequency Power: Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,003 bis 0,04 Hz

⁸ HRV-Parameter wird in dieser Arbeit nur bei der Analyse von 30 min. Intervallen betrachtet (Sammito et al. 2016)

- LF [ms^2]⁹: Low Frequency Power: Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,04 bis 0,15 Hz
- HF [ms^2]⁹: High Frequency Power: Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,15 bis 0,40 Hz
- TP [ms^2]⁹: Total Power: Gesamtleistung oder Gesamtspektrum; entspricht Energiedichte im Spektrum von 0,00001 bis 0,4 Hz
- LF [%]: Prozentualer Low Frequency-Anteil am Gesamtspektrum
- HF [%]: Prozentualer High Frequency-Anteil am Gesamtspektrum
- LF nu: Low Frequency normalized unit: entspricht $\text{LF}/(\text{TP} - \text{VLF}) \times 100$
- HF nu: High Frequency normalized unit: entspricht $\text{HF}/(\text{TP} - \text{VLF}) \times 100$
- LF/HF⁹: Verhältnis des LF-Bands zum HF-Band

nicht-lineare Parameter

- SD1 [ms]: Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser
- SD2 [ms]: Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser
- DFA1: Detrended fluctuations; Grad der Zufälligkeit/Korrelation; reicht von 0,5 (zufällig) bis 1,5 (korreliert) mit Normalwerten um 1,0; wird häufig als nicht-linearer Parameter für kurze NN-Intervall-Daten genutzt, kurzfristige Fluktuationsneigung
- DFA2: Detrended fluctuations; wird häufig als nicht-linearer Parameter für NN-Intervalle längerer Aufzeichnungsdauer genutzt, reduzierte Werte sind assoziiert mit einer schlechten Prognose, langfristige Fluktuationsneigung

Die Auswahl der Parameter richtet sich nach der Auswertungsdauer und den Empfehlungen von Sammito et al. (2016).

Subjektive Beanspruchungsparameter

Zur Messung der subjektiven Beanspruchung werden die Eigenzustandsskala (EZ-Skala) nach Nitsch (1976), der Fragebogen zur visuellen Ermüdung (Visual Fatigue Questionnaire, VFQ) nach Bangor (2000) und der National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index (NASA-TLX) (Hart & Staveland 1988; Hart 2006) eingesetzt.

⁹ LF/HF wird in der Literatur häufig als sympatho-vagale Balance dargestellt. Die Aussage wird mittlerweile abgelehnt, da der LF-Domain nicht mehr nur vorrangig eine sympathische Aktivität zugeordnet wird, sondern auch die parasympathische Aktivität sowie mechanische Effekte der Atmung und die maßgebliche Herzschlagfrequenz Einfluss nehmen (Berntson et al. (1997); Billman (2013); Eller-Berndl (2015); Lohninger (2017)).

Die EZ-Skala als standardisiertes Testverfahren erfasst die situationsgebundene Beanspruchungs-, Motivations- und Stimmungslage einer Person als Ausdruck ihres aktuellen Gesamtbefindens und ermöglicht Aussagen über die antriebs- und ausführungsregulatorischen Erlebnisqualitäten des Individuums (Nitsch 1976). Dabei besteht die Skala aus 40 Eigenschaftswörtern, die auf einer sechsstufigen Ordinalskala von 1 „kaum“ bis 6 „völlig“ auf den augenblicklichen Zustand bezogen, zu bewerten sind. Die Adjektive werden zu 14 Binärfaktoren in einer dreistufigen Faktorenhierarchie zusammengefasst, um die Handlungsregulation anhand der Hauptgruppen „Motivation“ und „Beanspruchung“ darzustellen (vgl. Abbildung 19).

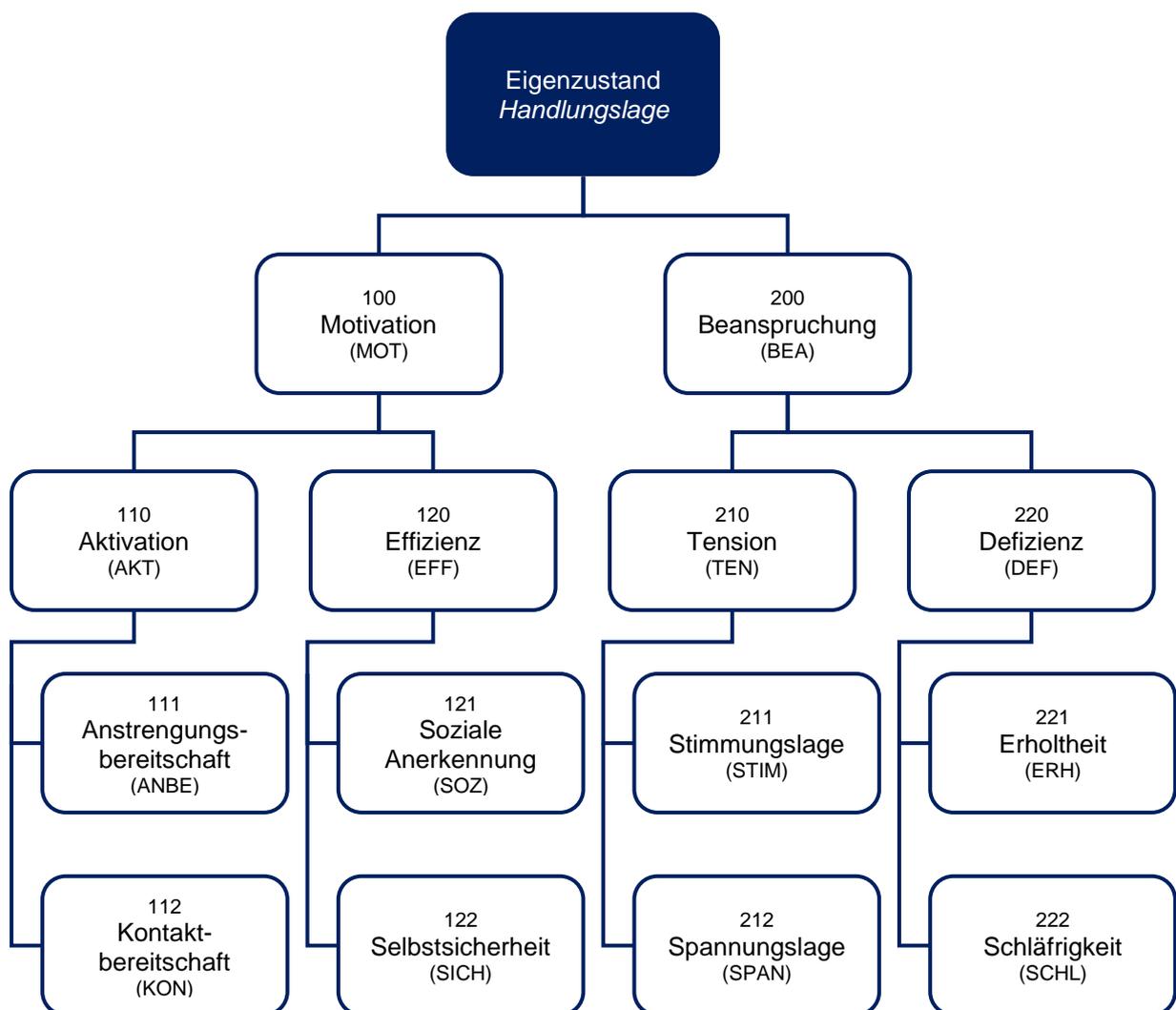


Abbildung 19: Eigenzustandsskala (mod. nach Nitsch 1976)

Im ersten Schritt der Auswertung werden die Punktwerte der Eigenschaftswörter durch flächentransformierte z' -Werte ersetzt. Die zu einem Binärfaktor zugehörigen z' -Werte werden aufsummiert und nach der Stanine-Transformation in Werte von 1 bis 9 umgewandelt. Hohe Stanine-Werte bedeuten im Allgemeinen eine positive Einschätzung der Person auf ihr Gesamtbefinden, ausgenommen der Faktoren 200 (Beanspruchung), 220 (Defizienz), 222

(Schläfrigkeit) und 212 (Spannungslage). Da es sich hier um umgepolte Faktoren handelt, beschreiben hohe Stanine-Werte eine negative Einschätzung der Befindlichkeit. Die Bearbeitungszeit der EZ-Skala liegt bei ca. zehn Minuten. Sie ist ein objektives, reliables und valides Instrument zur Messung von aktuellen, kurzfristigen Änderungen der Befindlichkeit (Kellmann & Golenia 2003).

Der VFQ (Bangor 2000) erhebt mit 16 Items verschiedene Dimensionen subjektiv empfundener visueller Beanspruchung und Ermüdung. Jedes Item wird von der Versuchsperson auf einer Skala von 1 (nicht bemerkbar) bis 10 (stark bemerkbar) bewertet. Die Berechnung eines zusammenfassenden Gesamtwertes ist nicht möglich. Die Bearbeitungszeit des VFQ liegt bei ca. drei Minuten.

Der NASA-TLX, entwickelt von Hart und Staveland (1988), ist ein mehrdimensionales Instrument zur Beanspruchungsmessung, eignet sich insbesondere zur Beurteilung nicht-körperlicher Arbeiten und ist ein etabliertes Instrument bei der Bewertung von digitalen Assistenzsystemen. Die Befragung gliedert sich in ein Rating (erster Teil) und ein Ranking (zweiter Teil). Zur Ergänzung liegt ein Blatt zur Definition der Belastungsfaktoren bei. Im ersten Teil bewerten die Probanden ihre Beanspruchung anhand der sechs unabhängigen Subskalen geistige Anforderungen, körperliche Anforderungen, zeitliche Anforderungen, erbrachte Leistung, Anstrengung und Frustration. Im zweiten Teil bewerten die Probanden anhand eines Paarvergleiches, welche Beanspruchungsdimension den größten bzw. kleinsten Anteil an ihrer Gesamtbeanspruchung haben. Anhand des Paarvergleichs werden die einzelnen Beanspruchungsfaktoren gewichtet und mit den Ergebnissen des ersten Teils die Gesamtbeanspruchung von 0 bis 100 Punkten ermittelt. Die Bearbeitungszeit des NASA-TLX liegt bei ca. drei Minuten. Der Fragebogen erfüllt die wissenschaftlichen Gütekriterien und hat z. B. im Gegensatz zu der Subjective Workload Assessment Technique (SWAT) und dem Subjektive Mental Effort Questionnaire (SMEQ) eine höhere Reliabilität und Validität (Eilers et al. 1990; Moise 2006).

Objektive Leistungsparameter

Da die einschränkungsfreie Erfassung des gesamten visuellen Ausgabegerätes (hier der Laptopbildschirm) bei der Arbeit am realen Arbeitsplatz mit dem Assistenzsystem wichtig ist, wird zur Messung der objektiven Leistung das Verfahren „Augenbewegung“ der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP) in der Version 2.2 nach Zimmermann und Fimm (2009) ausgewählt und angewendet (vgl. A9: Instruktion des TAP-Tests (Augenbewegung)) (Fa. PSYTEST, Herzogenrath, Deutschland).

Nachdem die Probanden einen zweiminütigen Vortest absolviert haben, startet der Test. Hier werden unter der Gap- und Overlap-Bedingung¹⁰ links, mittig und rechts zehn Zielreize¹¹ und zehn neutrale Reize gezeigt¹². Der Test umfasst 110 Reize mit 60 Zielreizen.

Während des Tests werden die Parameter Reaktionszeit (MW und M), Fehlerzahl, Auslassungen und Ausreißer für die Bereiche Gap links, Gap Mitte, Gap rechts, Overlap links, Overlap Mitte, Overlap rechts und gesamt gemessen.

Die Bearbeitungszeit des Testverfahrens „Augenbewegung“ liegt ohne Vortest und Instruktion bei ca. acht Minuten. Der Test erfüllt die wissenschaftlichen Gütekriterien Reliabilität, Validität und Objektivität (Zimmermann & Fimm 2015).

Usability

Zur Messung der Gebrauchstauglichkeit der Papierliste und der digitalen Liste wird in der Vorstudie, wie in vielen bisherigen Untersuchungen zur Usability-Bewertung von digitalen Assistenzsystemen, die SUS nach Brooke (1986) eingesetzt. Der Fragebogen deckt damit die Ebene „Zufriedenstellung“ des Konstrukts „Usability“ ab. Effizienz und Effektivität werden durch weitere Methoden (z. B. objektive Leistungsdaten) erhoben.

Diese „Quick-and-dirty“-Methode umfasst einen Fragebogen aus fünf positiv und fünf negativ formulierten Fragen, bei dem die Probanden anhand einer fünfstufigen Likert-Skala von „stimme gar nicht zu“ (1) bis „stimme voll zu“ (5) beurteilen, wie nutzerfreundlich sie ein System wahrnehmen. Es ergibt sich ein eindimensionaler globaler SU-Score zwischen 0 und 100, der anhand von Abbildung 20 interpretiert werden kann.

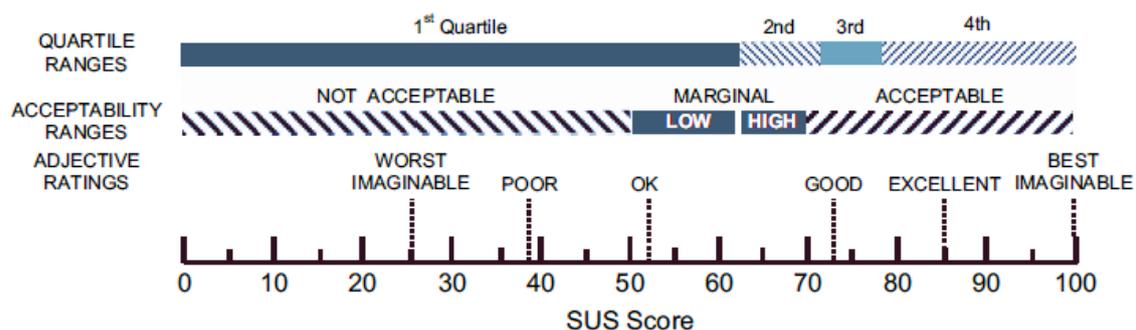


Abbildung 20: Interpretation der System Usability Scale (Bangor et al. 2009)

¹⁰ Bei der Gap-Bedingung liegt zwischen dem neutralen Reiz und Zielreiz ein zeitlicher Abstand, während sich bei der Overlap-Bedingung neutraler Reiz und Zielreiz überlappen.

¹¹ Ein Zielreiz ist ein aufgabenrelevanter Reiz, auf den die Versuchsperson – im Gegensatz zum neutralen Reiz – mit einem Tastendruck reagieren soll.

¹² ausgenommen der Bedingung „Overlap Mitte“. Hier entfallen die neutralen Reize.

Brooke empfiehlt, den Fragebogen je nach Einsatzgebiet individuell anzupassen. Daher wurde für die Vorstudie anstelle des Wortes „System“, der Begriff „Hilfestellung“ verwendet sowie die Frage 5 („Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind“) gestrichen und die Berechnung angepasst. Die Bearbeitungszeit der SUS liegt bei ca. zwei Minuten. Der Test entspricht den wissenschaftlichen Gütekriterien (Bangor et al. 2008) und weist herausragende Validitäts- und Reliabilitätswerte auf (Sauro 2011).

2.2.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Ein Pretest zur Vorstudie erfolgt am 03.02.2018. Durchgeführt wird die Vorstudie vom 13.02.2018 bis 11.06.2018 im psychophysiologischen Labor des IAM.

Zur Generierung valider Ergebnisse ist es essenziell, dass der Studienablauf und die Versuchsdurchführung für jeden Probanden unter gleichen Voraussetzungen und Vorgaben erfolgen. Als Hilfestellung wird ein Ablaufschema erstellt (vgl. Abbildung 21).

Nachdem die Probanden die Informationen zur Studie (vgl. A4: Probandeninformation zur Vorstudie) gelesen und die Einwilligungserklärung (vgl. A5: Einwilligungserklärung zur) unterzeichnet haben, wird der Langzeit-EKG Rekorder medilog AR12plus angelegt und eine ophthalmologische Statusuntersuchung (angelehnt an die arbeitsmedizinische Vorsorge für Bildschirmarbeitsplätze) mit dem Sehtestgerät Rodatest 300/302 (Fa. Vistec AG, Olching, Deutschland), ggf. mit vorhandener eigener Korrekturhilfe der Probanden, durchgeführt.

Getestet werden

- Visus (cc) (Sehschärfe mit Korrektur) für Nähe (55 und 40 cm) und Ferne (6 m),
- Phorie (Stellung der Augen bzw. Sehachsen),
- Stereopsis (räumliches Sehen) und
- Farbensinn.

Es folgt eine fünfminütige Ruhephase im Sitzen, bevor die Probanden den ersten Fragebogenkatalog ausfüllen. Hier werden allgemeine soziodemografische Angaben und typische Confounder (wie Alter, Geschlecht, Rauchen, Alkoholkonsum, Erkrankungen, Medikamenteneinnahme) sowie bisherige Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen erfasst (vgl. A6: Vorstudie: Soziodemografische Angaben und Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen). Zudem umfasst der Fragebogenkatalog den VFQ (vgl. A7: Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ)). Es folgt die Bearbeitung der EZ-Skala am Laptop (vgl. A8: Eigenzustandsskala (EZ-Skala)) und eines Aufmerksamkeitstests (Instruktion vgl. A9: Instruktion des TAP-Tests (Augenbewegung)).

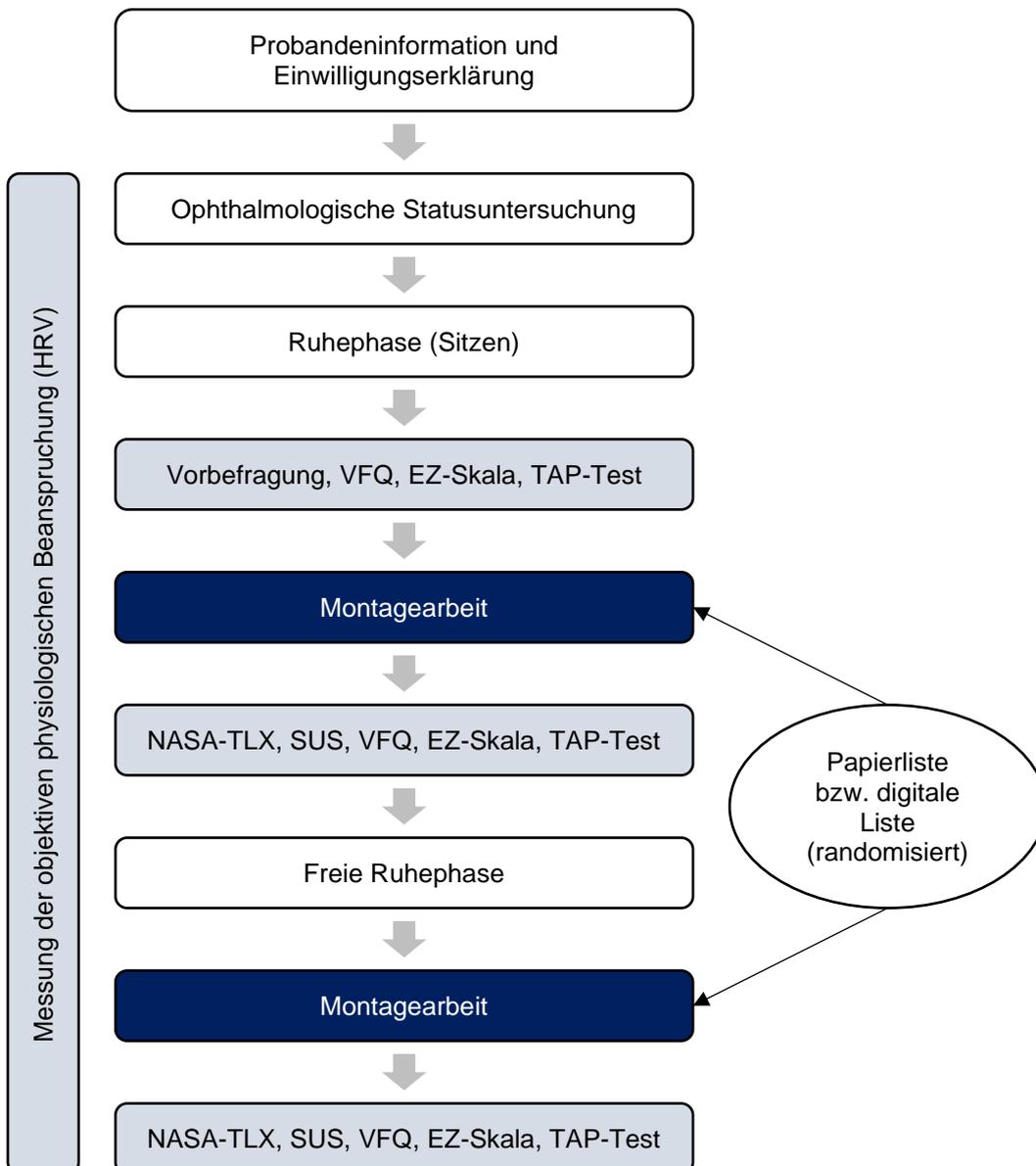


Abbildung 21: Ablauf der Vorstudie

In den Montagedurchläufen (jeweils 30 Minuten; einmal mit einer Papierliste und einmal mit einer digitalen Liste, die mit einem Laptop präsentiert wird) bearbeiten die Probanden Arbeitsaufgaben, bei denen schrittweise geometrische Figuren¹³ zusammengebaut werden müssen. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Probanden bei der Ausführung des modellierten Montageprozesses mit jeweiliger Variante. Nach den randomisierten Montagedurchläufen füllen die Probanden jeweils einen Fragebogenkatalog mit den Fragebögen NASA-TLX (vgl. A10: Fragebogen zum NASA-TLX), SUS (vgl. A11: Fragebogen zur SUS (Vorstudie)) und VFQ aus,

¹³ eigens konstruierte Figuren des Spiels „MODEL ‘8’ – Stimulates Creative Imagination“ (Fa. MODEL ‘8’, Malvern, Großbritannien)

bearbeiten die EZ-Skala und absolvieren den Aufmerksamkeitstest. Nach dem zweiten Durchlauf werden die Probanden zusätzlich nach ihrer favorisierten Variante gefragt (Hilfestellung in Papier- oder digitaler Form). Zwischen den Montagedurchläufen gibt es eine kurze Pause von ca. fünf Minuten.



Abbildung 22: Probandin in der Vorstudie bei der Arbeit mit der Papierliste (Foto: Annemarie Minow)

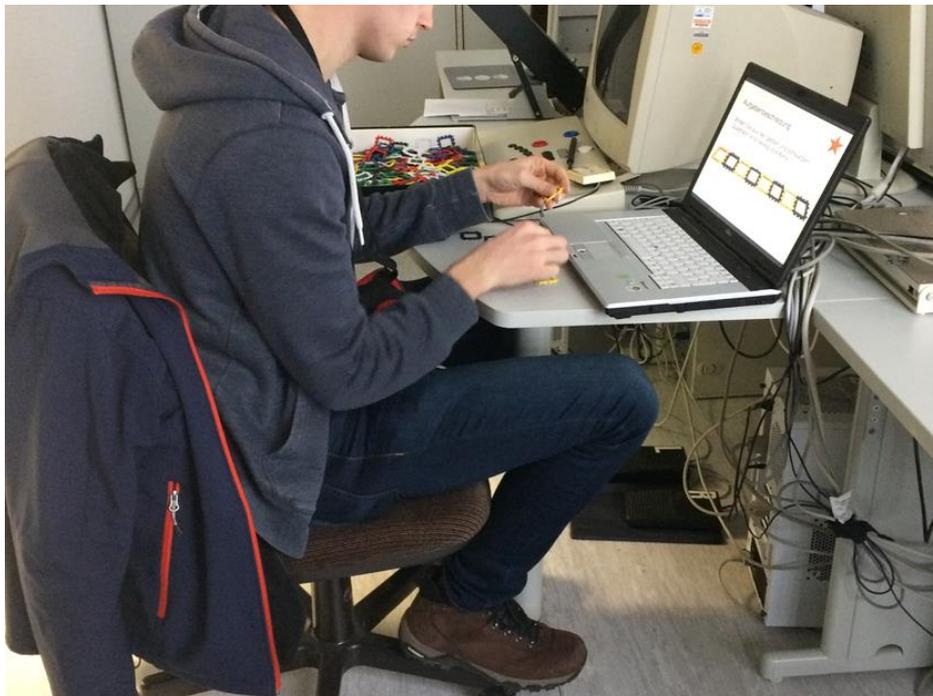


Abbildung 23: Proband in der Vorstudie bei der Arbeit mit der digitalen Liste (Foto: Annemarie Minow)

2.3 User-Test (VR)

Ziel des User-Tests ist die Weiterentwicklung des Assistenzsystems mithilfe einer VR-Simulation. Zudem soll, wie in der Vorstudie, die objektive und subjektive Beanspruchung des Nutzers, die objektive Leistung und die Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit durch die Probanden erfasst werden.

2.3.1 Probanden

Die Probandenakquise erfolgt über die gleichen Wege wie in der Vorstudie (vgl. Abschnitt 2.2.1; Aushang vgl. A12: Probandenaushang zum User-Test (VR)).

Für den User-Test sollen wie in der Vorstudie 20 bis 25 männliche und weibliche Probanden im erwerbsfähigen Alter akquiriert werden. Personen, die einen Visus (cc) unter 0,63 aufweisen, unter einer Stoffwechselerkrankung, z. B. Diabetes, oder Herzrhythmusstörungen leiden sowie bestimmte Medikamente (wie β -Blocker) einnehmen, können aufgrund möglicher Verzerrungen der HRV-Daten (Sammito et al. 2016) nicht an der Studie teilnehmen bzw. wurden danach aus der Bewertung ausgeschlossen.

2.3.2 Methodik

Wie in der Vorstudie werden die Methoden im User-Test an das psychophysiologische Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg (1969) angelehnt. Auf den verschiedenen Ebenen werden folgende Methoden angewendet:

Objektive physiologische Beanspruchungsparameter

Zur Messung der objektiven Beanspruchungslage wird auch hier die HRV genutzt. Ihre Erfassung und Auswertung erfolgt wie in der Vorstudie (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Als Datenbasis für die HRV-Analyse werden für die Phasen in Tabelle 9 Zeitfenster von fünf oder einer Minute (bei den Wegeventilen) gewählt. Verglichen werden stets Phasen gleicher Dauer. Bei den Auswertungen unter fünf Minuten werden nur zeitbezogene Parameter berechnet.

Von den drei Ruhephasen (vorher ohne VR-Brille, vorher mit VR-Brille und nachher ohne VR-Brille) wird zum Vergleich mit den Arbeitsphasen eine Ruhephase ausgewählt (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die ausgewählte Ruhephase wird in den nachfolgenden Berechnungen nur als „Ruhephase“ betitelt.

Tabelle 9: Auswertungsphasen für die HRV-Analyse des User-Tests (VR)

Ruhephase vorher (stehen) (ohne VR-Brille) (5 min.)	
Ruhephase vorher (stehen) (mit VR-Brille) (5 min.)	
1. Montagedurchlauf (5 min.)¹⁴	Montage mit Pick-to-Light (PtL) (5 min.)¹⁴ Wegeventil vor dem Puzzle mit PtL (1 min.) Wegeventil nach dem Puzzle mit PtL (1 min.)
2. Montagedurchlauf (5 min.)¹⁴	Montage mit AR-Konturen (5 min.)¹⁴ Wegeventil vor dem Puzzle mit AR (1 min.) Wegeventil nach dem Puzzle mit AR (1 min.)
Ruhephase nachher (stehen) (ohne VR-Brille) (5 min.)	

Subjektive Beanspruchungsparameter

Zur Messung der subjektiven Beanspruchung werden die EZ-Skala nach Nitsch (1976), der VFQ nach Bangor (2000) und die Rating Scale Mental Effort (RSME) (Zijlstra & Doorn, van 1985; Zijlstra 1993) eingesetzt.

Die EZ-Skala und der VFQ sind bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben worden. Da die EZ-Skala eine detaillierte Faktorenhierarchie aufzeigt, die auch in den weiteren User-Tests vorteilhaft sein kann, wird sie erneut eingesetzt. Auch der VFQ bietet durch seine Einzelitems einen guten Einblick über die möglichen, vielfältigen visuellen Beschwerden.

Im virtuellen User-Test wird die RSME (Zijlstra & Doorn, van 1985; Zijlstra 1993; ins Deutsche übersetzt und validiert durch Eilers et al. 1986) eingesetzt. Sie beschreibt eine eindimensionale Skala zur Einschätzung der erlebten geistigen Anstrengung mit einer Skala von 0 bis 220. Die RSME weist Ankerpunkte mit den Anstrengungsgraden „kaum“, „etwas“, „einigermaßen“, „ziemlich“, „stark“, „sehr stark“ und „außerordentlich“ auf. Die Bearbeitungszeit beträgt ca. eine Minute. Dieser Test wurde hier anstelle des NASA-TLX ausgewählt, da der NASA-TLX für einige Probanden in der Vorstudie unklar in der Differenzierung der Subskalen und durch die Kombination des Ratings und Rankings relativ zeitaufwendig war. Zudem konnten Ghanbary Sartang et al. (2016) mittlere bis hohe positive Korrelationen zwischen dem Gesamtscore und den Subskalen des NASA-TLX und der RSME zeigen und empfehlen die RSME als geeignete Methode zur Beurteilung der mentalen Arbeitsbeanspruchung.

¹⁴ Die fünf Minuten wurden ausgehend vom zweiten Wegeventil im jeweiligen Durchlauf ausgewählt. Sollte die Montage des zweiten Wegeventils weniger als fünf Minuten in Anspruch nehmen, wurde die Montage der vorangegangenen geometrischen Figuren mit der jeweiligen Modalität hinzugezogen, sollte auch dies nicht fünf Minuten ergeben, wurde das erste Wegeventil hinzugezogen. Kurze Unterbrechungen (vom Umschalten geometrischer Figuren auf Wegeventil und Einstellen des Displays vor Montage des Wegeventils) betragen wenige Sekunden.

Objektive Leistungsparameter

Zur Messung der objektiven Leistung wird während der Montage der Wegeventile die Fehlerzahl (Falsches Greifen und falsche Ausrichtung von Bauteilen¹⁵) und die Bearbeitungszeit durch die virtuelle Anwendung gemessen.

Usability und Nutzerakzeptanz

Wie in der Vorstudie wird auch im virtuellen User-Test die SUS zum globalen Vergleich der Zufriedenheit von zwei Assistenzfunktionen eingesetzt. Anpassungen im Vergleich zum Einsatz der SUS in der Vorstudie erfolgen hinsichtlich der Bezeichnung von „Hilfestellung“ zu „System“ sowie der Ergänzung der Aussage aus dem Originalfragebogen „Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind“. Da ggf. ein niedriger Wert der SUS zwar ein Problem des Assistenzsystems aufzeigt, das Problem jedoch nicht genauer differenziert, wird im Rahmen dieses User-Tests zusätzlich der ISONORM-Fragebogen eingesetzt (Prümper & Anft 1993; Prümper 1997). Er ist angelehnt an die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2008)¹⁶ und existiert in einer Lang- und einer Kurzform. Aus zeitökonomischen Gründen wird für diese Teilstudie die Kurzversion ausgewählt (Pataki et al. 2006). Sie enthält im Original drei Items je Gestaltungsgrundsatz. Die positiv und negativ formulierten Aussagen zur Software werden in einem bipolaren Frageformat mit sieben Stufen (- - bis + + +) dargestellt. Untersuchungen belegen die Validität und Reliabilität des Fragebogens (Prümper 1997). Der ISONORM-Fragebogen wurde für den User-Test leicht modifiziert: Der Begriff „Software“ wurde zu „Assistenzsystem“ konkretisiert und nach dem Pretest das zweite Item zu Steuerbarkeit (SK) und das erste Item zu Lernförderlichkeit (LK) gestrichen. Beide Instrumente decken insbesondere die Ebene Zufriedenheit des Konstrukts Usability ab. Effektivität und Effizienz werden, wie in der Vorstudie, durch andere Methoden (z. B. Messung der objektiven Leistungsdaten) mitberücksichtigt.

Zur Messung der Nutzerakzeptanz werden darüber hinaus Skalen des TAM herangezogen (vgl. Abschnitt 1.2.5). Die wahrgenommene Nützlichkeit (Perceived Usefulness) und die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (Perceived Ease of Use) sind die zwei zentralen Aspekte, die die Nutzungsintention und damit auch das tatsächliche Nutzungsverhalten beeinflussen (King & He 2006) und werden daher für die vorliegende Untersuchung verwendet.

¹⁵ Da sich die Fehlerzahl insgesamt auf einem niedrigen Niveau befindet, werden die Fehlerzahlen zum falschen Greifen und zur falschen Ausrichtung von Bauteilen zusammengefasst.

¹⁶ Zum Zeitpunkt der Methodenauswahl war die Ausgabe der DIN EN ISO 9241-110 von September 2008 die aktuelle Fassung. Daher wird in dieser Arbeit überwiegend der Begriff „Dialoggestaltung“ verwendet. Mittlerweile wurde der Normteil 110 aktualisiert und der Begriff in „Interaktionsprinzipien“ geändert (Ausgabe Oktober 2020).

2.3.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Ein Pretest zum virtuellen User-Test erfolgt am 29.03.2019. Durchgeführt wird der User-Test vom 15.04.2019 bis 28.06.2019 bei der Firma LIVING SOLIDS GmbH. Zur Gewährleistung eines einheitlichen Versuchsablaufs wird eine Versuchsanweisung und ein Ablaufplan (vgl. Abbildung 24) erstellt. Während des Versuchs sind jeweils eine wissenschaftliche Mitarbeiterin des IAM und ein Mitarbeiter der LIVING SOLIDS GmbH anwesend.

Versuchsaufbau

Eine HTC Vive VR-Brille mit zwei Basisstationen zur Erfassung von Position und Orientierung der Brille im Raum stellt den hardwareseitigen Versuchsaufbau dar. Um die für die Montageaufgaben relevanten Nutzereingaben (Greifen von Bauteilen, Bewegen von Bauteilen und Loslassen der Bauteile bei Erreichen der Verbauposition) zu erfassen, wird die VR-Brille mit einem Leap Motion Sensor ausgestattet. Dieser erkennt die Hände und Handstellung und ermöglicht damit eine möglichst intuitive Interaktion mit virtuellen Objekten. Zur Simulation der Arbeitsumgebung wird ein Raum und darin ein realer Arbeitsplatz mithilfe von 3D-Modellen der Einzelobjekte nachgebildet (vgl. Abbildung 25).

Die notwendigen Behälter, Vorrichtungen und Bauteile werden als 3D-Objekte in das Szenario integriert und – soweit erforderlich – bedienbar bzw. manipulierbar gemacht. Für die Versuche wird die interaktive virtuelle Anwendung mit Funktionen ausgestattet, die die Versuchsdurchführung unterstützen (z. B. die Möglichkeit der einfachen Konfiguration des Versuchsablaufs, Erfassung der objektiven Leistungsdaten) (Minow et al. 2020).

Versuchsablauf

Nachdem die Probanden die Informationen zur Studie (vgl. A13: Probandeninformation zum User-Test (VR)) gelesen und die Einwilligungserklärung (vgl. A5: Einwilligungserklärung zur) unterzeichnet haben, wird eine ophthalmologische Statusuntersuchung mit dem Rodatest 300/302, ggf. mit vorhandener eigener Korrekturhilfe der Probanden, durchgeführt. Probanden, die hier eine Brille nutzen, trugen diese auch später beim Versuch unter der VR-Brille. Getestet werden

- Visus (cc) (Sehschärfe mit Korrektur) für Nähe (55 und 40 cm) und Ferne (6 m),
- Phorie (Stellung der Augen bzw. Sehachsen),
- Stereopsis (räumliches Sehen),
- Farbensinn und
- Gesichtsfeld.

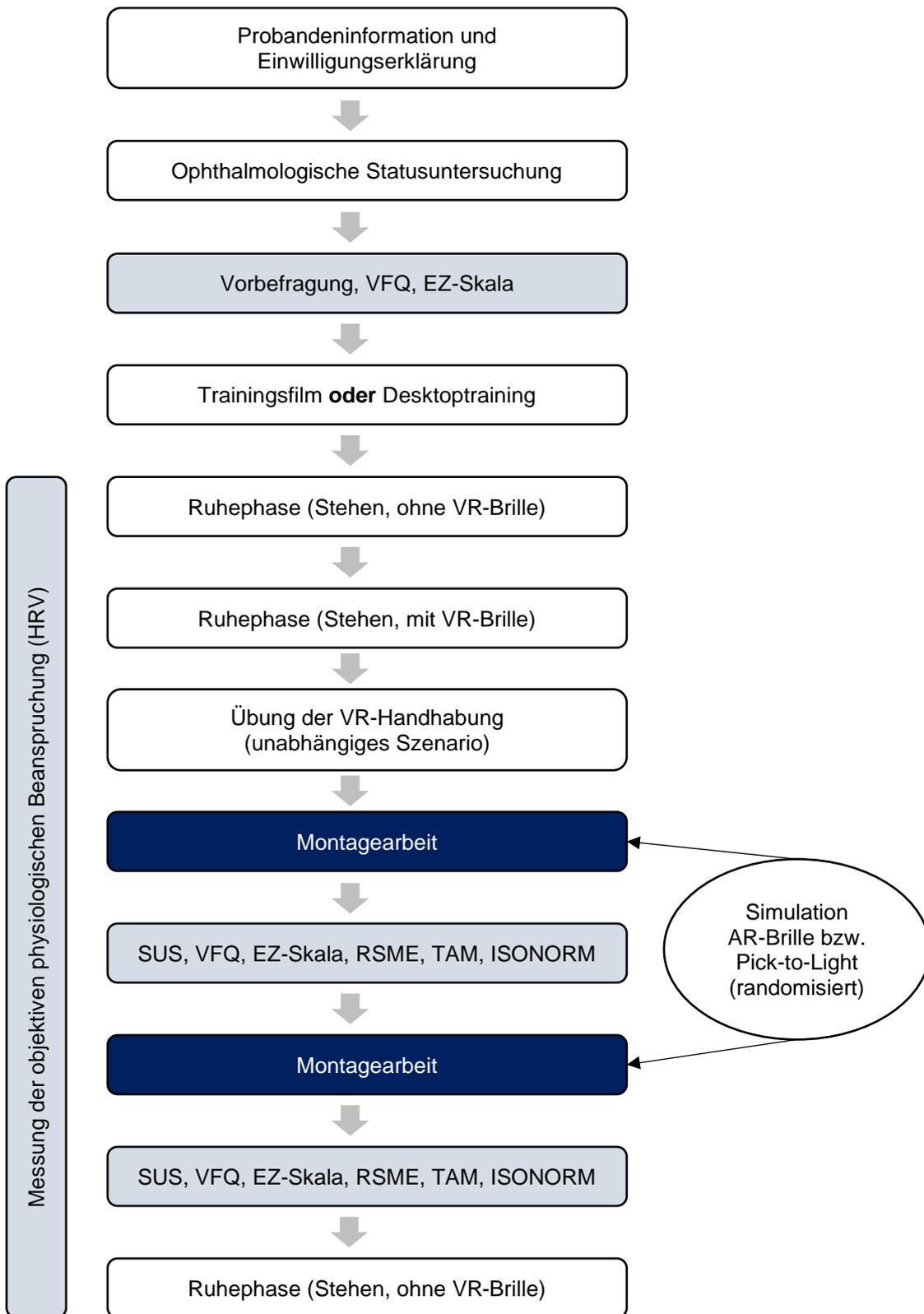


Abbildung 24: Ablauf des User-Tests (VR)

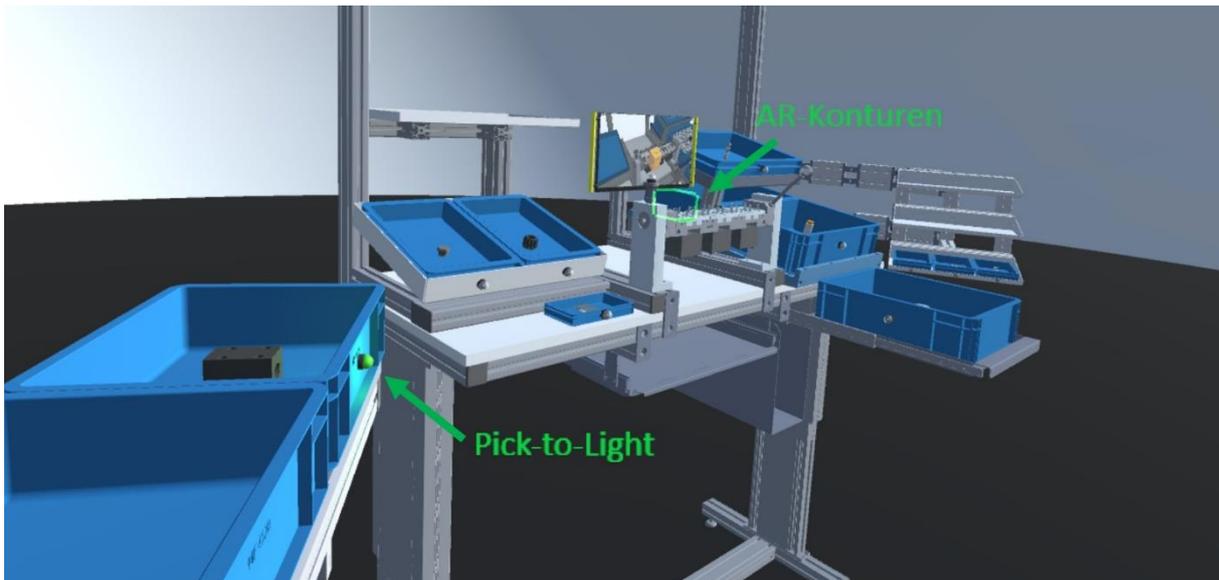


Abbildung 25: Virtueller Arbeitsplatz mit Assistenzsystemen im virtuellen User-Test

Die Probanden füllen anschließend einen Fragebogenkatalog mit soziodemografischen Angaben und typischen Confoundern (wie Alter, Geschlecht, Rauchen, Alkoholkonsum, Erkrankungen, Medikamenteneinnahme) sowie bisherigen Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen und Erfahrungen mit VR-Brillen aus (vgl. A14: User-Test (VR und Real): Soziodemografische Angaben und Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen). Zudem umfasst der Fragebogenkatalog den VFQ (vgl. A7: Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ)) und die EZ-Skala (vgl. A8: Eigenzustandsskala (EZ-Skala)). Da es sich bei den Probanden nicht um gelernte Montagearbeiter handelt, absolviert eine Hälfte der Probanden vor Beginn der Montageaufgaben ein Desktoptraining (drei Stufen mit steigendem Schwierigkeitsgrad, Dauer insgesamt ca. acht Minuten), um den Montageablauf des Wegeventils zu üben. Zunächst klicken die Probanden lediglich das nächste zu verbauende Bauteil an, welches bereits farblich markiert ist. Anschließend muss das nächste Bauteil selbst erkannt werden und im letzten Durchlauf muss das nächste Bauteil selbst erkannt und an der richtigen Stelle platziert werden. Die Kontrollgruppe schaut sich jeweils dreimal ein ca. zweiminütiges Video zur Montage des Wegeventils an (im Folgenden Trainingsfilm genannt).

Es folgt das Anlegen des Langzeit-EKG Rekorder medilog AR12plus und eine fünfminütige Ruhephase im Stehen. Danach erhalten die Probanden mittels kurzer mündlicher PowerPoint-Präsentation durch die Versuchsleitung erste Infos zur Handhabung der VR-Brille (vgl. A15: Kurzpräsentation zur VR-Handhabung im User-Test). Die VR-Brille wird aufgesetzt und angepasst und erneut ist eine fünfminütige Ruhephase im Stehen zu absolvieren. Um Schwindelgefühl und Orientierungslosigkeit durch einen schwarzen VR-Bildschirm zu vermeiden, sehen die Probanden einen leeren Montagearbeitsplatz durch die VR-Brille (vgl. Abbildung 26).

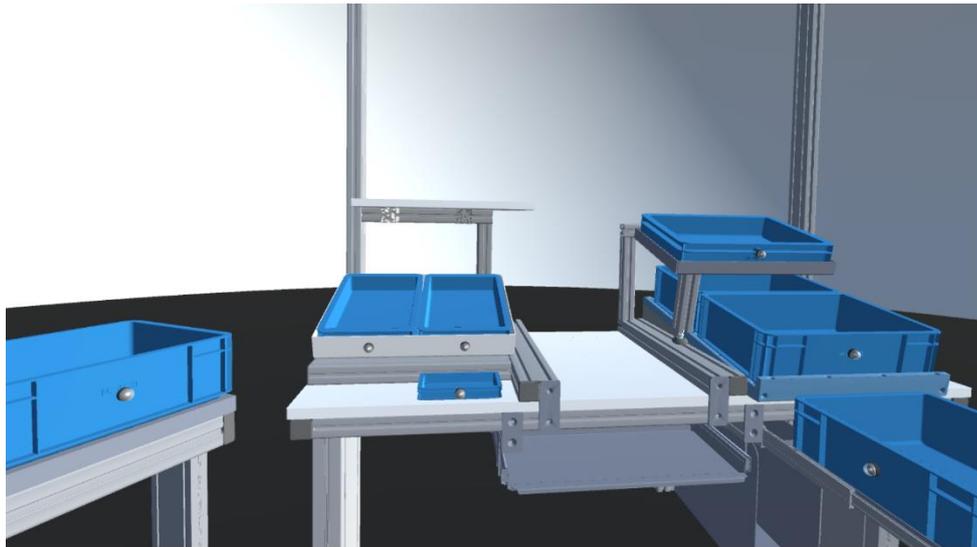


Abbildung 26: Ansicht des VR-Raums bei Ruhephase im Stehen mit VR-Brille

Anschließend machen sich die Probanden in einem vom Wegeventil unabhängigen Szenario (Montage einer Turbine) mit der VR-Handhabung vertraut (z. B. Greifen und Bewegen von Teilen üben) (vgl. Abbildung 27).

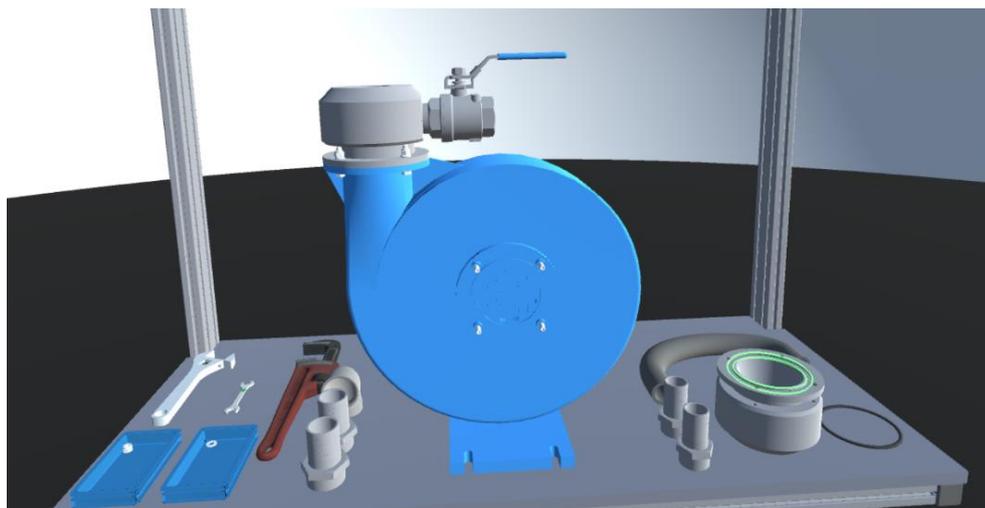


Abbildung 27: Unabhängiges Trainingszenario zur Übung der VR-Handhabung

Die Probanden montieren anschließend in zwei randomisierten Durchgängen (Simulation einer AR-Brille mithilfe von Konturen und Simulation eines Pick-to-Light-Systems) jeweils das gleiche Wegeventil, drei geometrische Figuren, angelehnt an die in Abschnitt 2.2 beschriebene Vorstudie (vgl. A16: Geometrische Figuren aus User-Test (VR)) und erneut das Wegeventil (vgl. Abbildung 28).



Abbildung 28: Zwei Probanden mit VR-Brille im virtuellen User-Test (Foto: Annemarie Minow)

Bei dem Pick-to-Light-System wird dem Probanden mithilfe eines grün aufleuchtenden Lämpchens angezeigt, aus welcher Kiste das nächste zu verbauende Teil gegriffen werden muss (vgl. Abbildung 29).

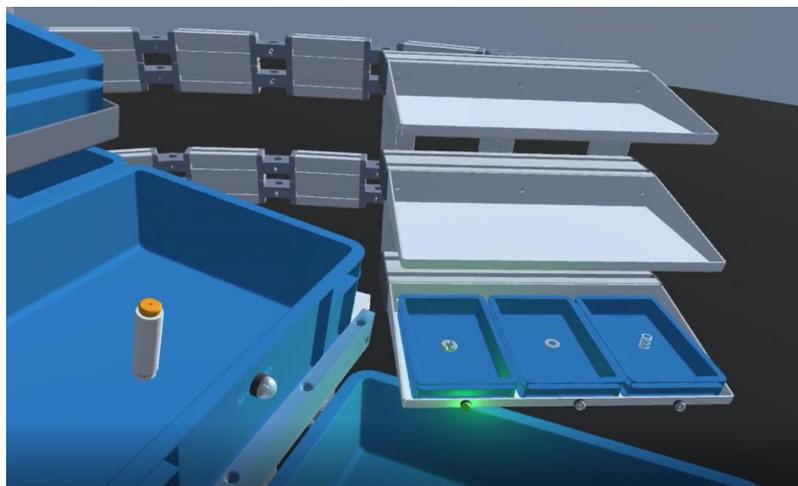


Abbildung 29: Simulation im User-Test (VR) – Pick-to-Light-System

Das zweite Assistenzsystem stellt die Simulation einer AR-Brille mittels grün eingeblendeter Konturen dar. Hier werden den Probanden Konturen am Verbauport der Bauteile eingeblendet (vgl. Abbildung 30).

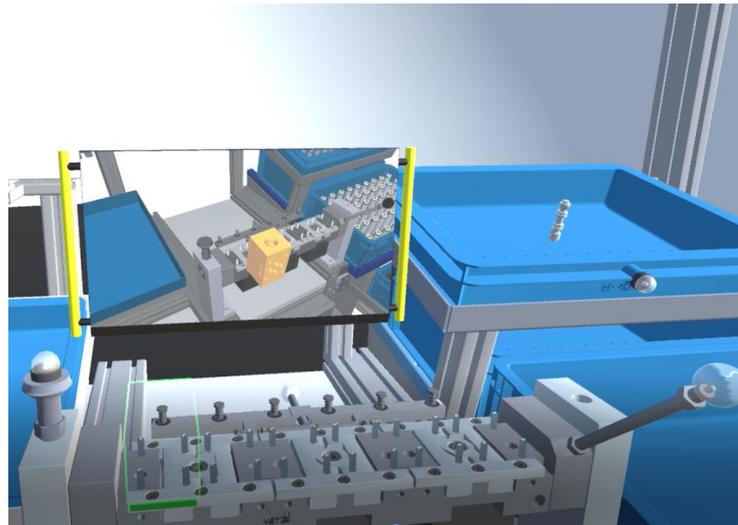


Abbildung 30: Simulation im User-Test (VR) – AR-Konturen im Vordergrund und Display im Hintergrund

Bei beiden simulierten Modalitäten ist im Hintergrund ein Display sichtbar (vgl. Abbildung 30), auf dem Videosequenzen des nächsten Montageschrittes abgespielt werden. Während der Montage gibt es ein akustisches Signal, wenn ein Teil richtig verbaut wurde.

Der Zusammenbau des Wegeventils besteht aus 15 Schritten. Eine Übersicht ist in A17: Schrittweiser Zusammenbau des Wegeventils (User-Test VR) zu finden.

Von den geometrischen Figuren existieren zwei Varianten mit jeweils drei Figuren, die randomisiert werden. Nach den Montagedurchläufen füllen die Probanden jeweils einen Fragebogenkatalog mit den Fragebögen EZ-Skala (vgl. A8: Eigenzustandsskala (EZ-Skala)); RSME (vgl. A18: Fragebogen zur Rating Scale Mental Effort (RSME)), VFQ (vgl. A7: Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ)), SUS (vgl. A19: Fragebogen zur SUS (User-Test VR)), TAM (vgl. A20: Fragebogen zum Technology Acceptance Model (TAM) – ausgewählte Skalen) und ISO-NORM (vgl. A21: ISONORM-Fragebogen (short)) aus. Nach dem zweiten Durchlauf werden die Probanden zusätzlich nach ihrer Favoritenvariante gefragt (AR-Konturen oder Pick-to-Light-System).

Der Versuch endet mit einer fünfminütigen Ruhephase im Stehen ohne VR-Brille.

2.4 User-Test (Real)

Ziel des zweiten User-Tests ist, das Assistenzsystem als realen Prototyp an einem Modellarbeitsplatz zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Zudem sollen, wie in der Vorstudie und dem User-Test mittels VR, die objektive und subjektive Beanspruchung des Nutzers erfasst werden. Im Fokus des Versuchs steht die Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit durch die Probanden.

2.4.1 Probanden

Die Probandenakquise erfolgt an den Einrichtungen der beteiligten Forschungspartner (IAM und Fraunhofer IFF). Der Bereich Arbeitsmedizin akquiriert durch persönliche Ansprache Studierende der OvGU sowie der Hochschule Magdeburg-Stendal und das Fraunhofer IFF eigene wissenschaftliche Mitarbeiter.

Aufgrund des vorrangig qualitativen Charakters des User-Tests mit dem Prototyp und der begrenzten zeitlichen Ressourcen soll eine kleinere Stichprobe als in der Vorstudie und dem User-Test (VR) untersucht werden. Es sollen ca. 10 männliche und weibliche Probanden im erwerbsfähigen Alter akquiriert werden. Personen, die einen Visus (cc) unter 0,63 aufweisen, unter einer Stoffwechselerkrankung, z. B. Diabetes, oder Herzrhythmusstörungen leiden sowie bestimmte Medikamente (wie β -Blocker) einnehmen, können aufgrund möglicher Verzerrungen der HRV-Daten (Sammito et al. 2016) nicht an der Studie teilnehmen bzw. wurden danach aus der Bewertung ausgeschlossen.

2.4.2 Methodik

Wie in der Vorstudie und dem User-Test mittels VR in Zusammenarbeit mit der LIVINGSOLIDS GmbH wird auch dieser User-Test an das psychophysiologische Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg (1969) angelehnt. Auf den Ebenen werden verschiedene Methoden zur Erfassung folgende Parameter angewandt:

Objektive physiologische Beanspruchungsparameter

Zur Messung der objektiven Beanspruchungslage wird auch in diesem User-Test die HRV genutzt. Ihre Ermittlung und Auswertung erfolgt, wie in der Vorstudie und dem virtuellen User-Test, durch die Erfassung der NN-Intervalle (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Als Datenbasis für die HRV-Analyse werden für die Montagephase und die Ruhephase Zeitfenster von fünf jeweils Minuten gewählt (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Auswertungsphasen für die HRV-Analyse des User-Tests (Real)

Montage (5 min.)
Ruhephase¹⁷ nachher (stehen) (5 min.)

¹⁷ Aus den Erkenntnissen der zwei vorangegangenen Studien wird auf die Ruhephase vor Beginn des Versuchs verzichtet.

Subjektive Beanspruchungsparameter

Wie in dem User-Test mittels VR wird in dem realen User-Test am Fraunhofer IFF die RSME (Zijlstra & Doorn, van 1985; Zijlstra 1993) angewendet, da sie ein zeitökonomisches Instrument zur subjektiven Beanspruchungsermittlung darstellt.

Objektive Leistungsparameter

Die zentrale Methode dieses User-Tests ist die Anwendung des Lauten Denkens. Da die Möglichkeit besteht, dass die Verbalisierung während des Montagevorgangs die objektive Leistung der Probanden negativ beeinflusst (Ericsson & Simon 1980; Schooler et al. 1993; Funke & Spering 2006) werden objektive Leistungsparameter im Rahmen dieses User-Tests nicht näher untersucht.

Usability

Zur Einschätzung der Usability werden entgegen der Vorgehensweise in der Vorstudie und dem virtuellen User-Test keine quantitativen Methoden, sondern wird eine vertiefende qualitative Methode genutzt. Verwendet wird die Methode des Lauten Denkens als introspektive Erhebungsmethode (Heine & Schramm 2007). Diese Art der Datenerhebung entsteht zu Beginn des 20. Jahrhunderts in der psychologischen Forschung und findet aktuell Anwendung in Forschungsbereichen zur Mensch-Maschine-Interaktion oder bei Usability-Tests (Konrad 2010). Sie ermöglicht es, Einblicke in die Gedanken und Gefühle einer denkenden Person zu bekommen, die sonst bei dem Versuch unausgesprochen bleiben würden. Bei dem Lauten Denken (synonyme Begriffe sind u. a. Denke-Laut-Methode, Think(ing) Aloud und Verbal Protocol) werden die Probanden aufgefordert, ihre Wahrnehmungen zu verbalisieren (Konrad 2010). Im User-Test geschah dies im Rahmen der Probandeninformation sowie in mündlicher Form zu Beginn der Montage.

Es existieren verschiedene Formen des Lauten Denkens: Einerseits gibt es eine augenblickliche Verbalisierung (Introspektion), bei der eine sehr enge Verbindung zwischen Gedanken und deren Verbalisierung nachweisbar ist (Ericsson & Simon 1993), andererseits aber auch unmittelbare und verzögerte Retrospektionen, bei denen sich die Versprachlichung zeitlich verschiebt. Dies kann wenige Augenblicke, aber auch mehrere Tage umfassen.

In diesem User-Test werden die Probanden gebeten, ihre Wahrnehmungen augenblicklich zu äußern (Introspektion). Die Verbalisierungen werden zur erleichterten nachträglichen Ergebnisauswertung von der beobachtenden Versuchsleitung in einem unstrukturierten Beobachtungsprotokoll notiert. Zusätzlich wird eine mediale Unterstützung durch Video- und Tonaufnahmen vorgenommen. Um jedoch nicht nur die augenblicklichen Gedanken der Probanden zu erfassen, sondern auch zu rekonstruieren, wie Handlungen und Problemlösungen während

der Montage entstanden sind, wird nach dem Versuch ein teilstrukturiertes narratives Interview (Helfferich 2011) durchgeführt und mit einer Audioaufnahme aufgezeichnet. Das Kurzinterview kann damit als verzögerte Retrospektion oder als „Lautes Erinnern“ eingeordnet werden (Knorr & Schramm 2012).

Die Interviews werden angelehnt an die Transkriptionsregeln von Kallmeyer & Schütze (1976), die ihren Fokus auf eine leichte Lesbarkeit legen und sich damit gut für inhaltsanalytische Auswertungsverfahren eignen, mit der Software Express Scribe (Fa. NCH Software, Australien, Canberra) verschriftlicht. Die Anonymität der Studienteilnehmer wird gewährleistet. Die Interviews und deren Transkriptionen werden ausschließlich mit Probandennummer, Geschlecht, Alter und Gruppe (Studierende oder wissenschaftliche Mitarbeiter) gekennzeichnet.

Die Auswertung der Transkripte erfolgt mittels inhaltsanalytischer Zusammenfassung nach Mayring (2015). Zur Entwicklung eines Kategoriensystems werden die deduktive und induktive Kategorienbildung kombiniert. Im Rahmen des deduktiven Entwicklungsprozesses werden Kategorien anhand des theoretischen Wissenstands und der Interviewkomplexe erstellt. Die induktive Herangehensweise bildet Kategorien aus dem Interviewmaterial heraus. Auf Grundlage der formulierten Themenbereiche des Interviewleitfadens werden Kategorien gebildet, in die die paraphrasierten Aussagen und prägnante Ankerbeispiele eingeordnet werden. Dabei wird das Kategoriensystem in einer Arbeitsgruppe während des Materialdurchgangs stetig angepasst, sodass in dieser Teilstudie ein Kategoriensystem mit neun Kategorien entsteht. Die Ergebnisse aus den Interviews werden mit den Eindrücken aus dem Beobachtungsprotokoll und dem aufgezeichneten Video- und Tonmaterial verglichen und ergänzt und dann zu einem Gesamtbild zusammengefasst (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Um Verzerrungen in der qualitativen Auswertung durch eine Einzelperson zu minimieren und eine intersubjektive Nachvollziehbarkeit (Steinke 2000) zu erreichen, erfolgt eine Forschertriangulation (Misoeh 2015).

2.4.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Ein Pretest des realen User-Tests findet am 06.12.2019 statt. Die weiteren Versuche werden am 11.12.2019 und am 14.01.2020 durchgeführt.

Zur Gewährleistung eines einheitlichen Versuchsablaufs wird eine Versuchsanweisung und ein Ablaufplan (vgl. Abbildung 31) erstellt. Während des Versuchs sind jeweils zwei wissenschaftliche Mitarbeiterinnen des Bereichs Arbeitsmedizin und ein Mitarbeiter des Fraunhofer IFF anwesend.

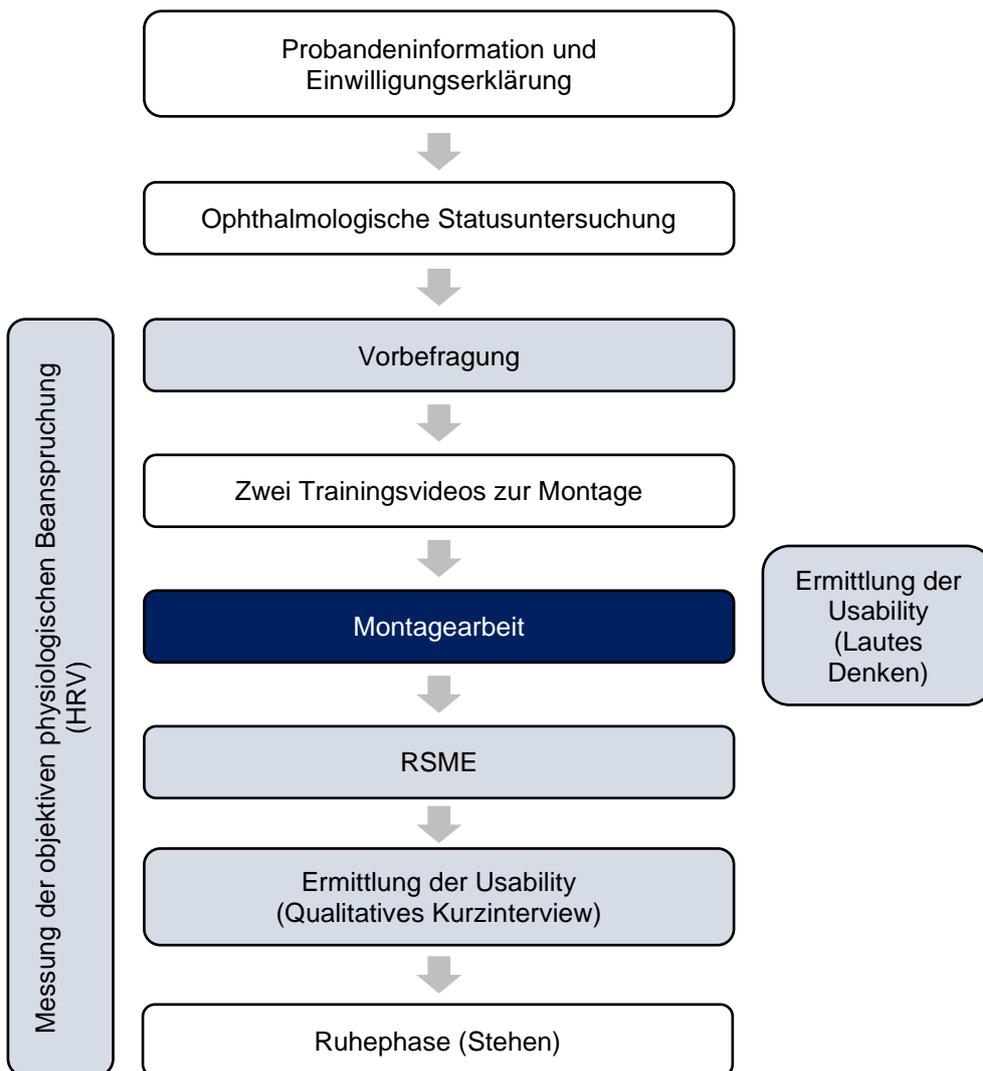


Abbildung 31: Ablauf des User-Tests (Real)

Versuchsaufbau

Das Assistenzsystem steht zum Zeitpunkt des Versuchs als Prototyp bereit. Die Abbildung 32 zeigt den Montagearbeitsplatz.

Es werden zwei Bildschirme zur Verfügung gestellt. Der linke Bildschirm (vgl. Abbildung 33) enthält ein Echtzeit-Kamerabild des Werkstücks mit Einblendung von lilafarbenen AR-Konturen, an deren Stelle das nächste Bauteil montiert werden muss. Auf diesem Bildschirm wird zusätzlich der aktuelle Verbauschritt (Einzelschrittanweisung ggf. mit nötigem Werkzeug) über dem Kamerabild dargestellt sowie eine Gesamtliste der Montageschritte auf der rechten Seite mit einer Statusanzeige darüber, wieviel Prozent der Montage bereits erledigt sind.



Abbildung 32: Arbeitsplatz mit Assistenzsystem für realen User-Test (Foto: Matthias Hauptvogel)

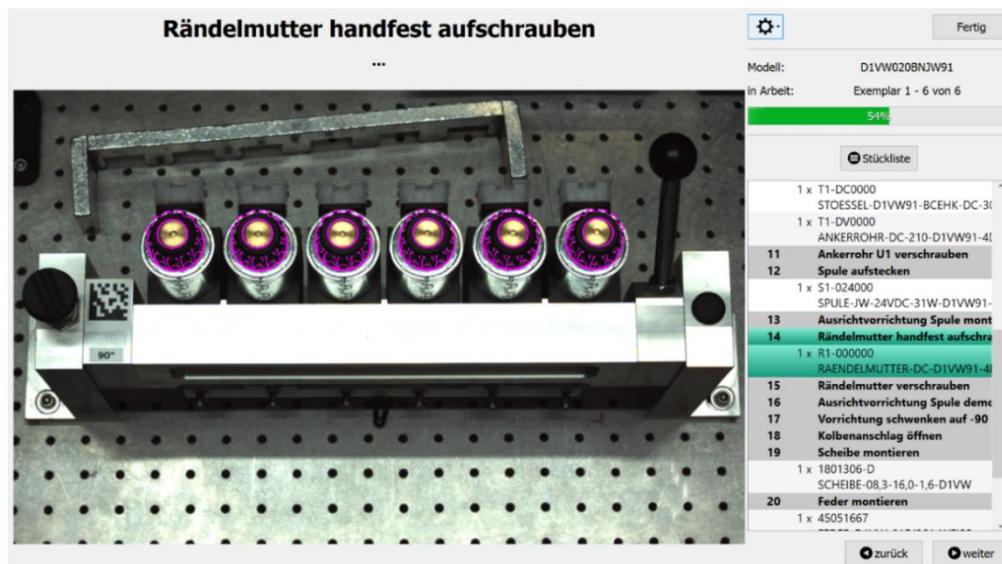


Abbildung 33: Linker Bildschirm des Montageassistenten im realen User-Test

Auf dem rechten Bildschirm (vgl. Abbildung 34) findet der Nutzer eine CAD¹⁸-Ansicht mit dem digitalen Werkstück und den zugehörigen Bauteilen. Das CAD-Modell kann vergrößert und verkleinert werden und es kann das gesamte Wegeventil oder alternativ das aktuelle Bauteil angezeigt werden.

¹⁸ CAD (engl. computer-aided design) bezeichnet die rechnergestützte Konstruktion geometrischer Modelle (z. B. von Produkten der manuellen Montage).

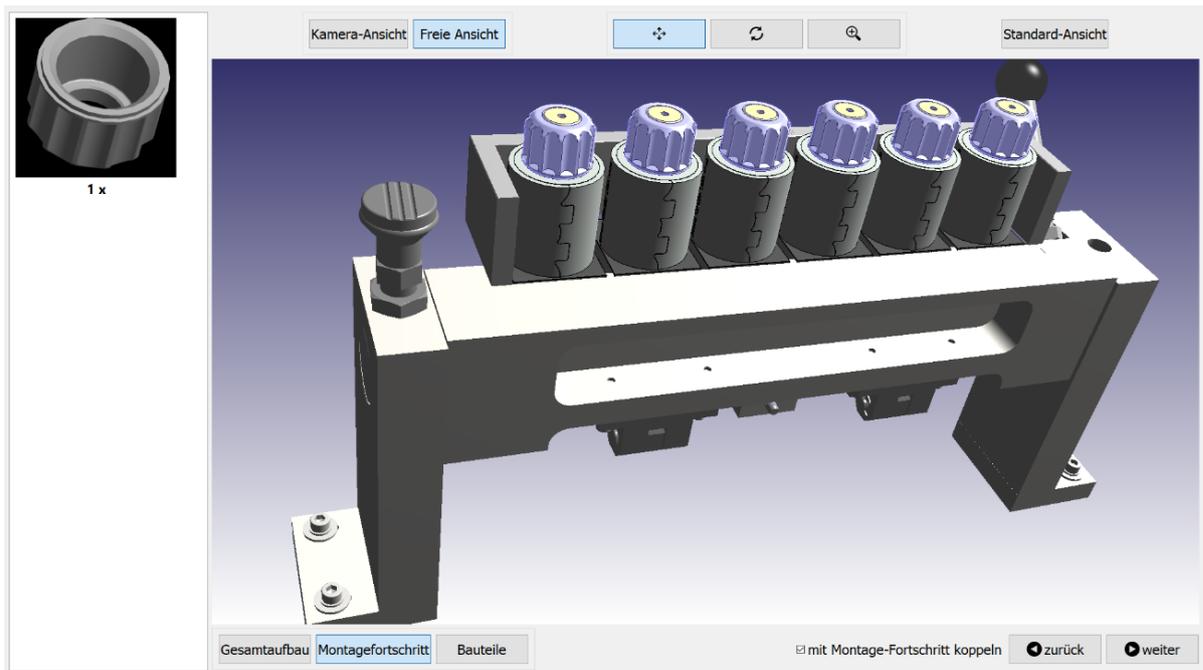


Abbildung 34: Rechter Bildschirm des Montageassistenten im realen User-Test

Perspektivisch soll das Assistenzsystem sensorbasiert erkennen, ob ein Bauteil richtig montiert wurde und davon abhängig den nächsten Verbauschritt anzeigen. Diese Funktion liegt im hier getesteten Prototypen noch nicht vor, sodass die Probanden nach jedem Montageschritt „weiter“ in der Montageschrittanleitung auf dem linken Bildschirm drücken müssen.

Versuchsablauf

Nachdem die Probanden die Informationen zur Studie (vgl. A22: Probandeninformation zum User-Test (Real)) gelesen und die Einwilligungserklärung (vgl. A5: Einwilligungserklärung zur Studienteilnahme) unterzeichnet haben, wird eine ophthalmologische Statusuntersuchung mit dem Rodatest 300/302 durchgeführt. Getestet werden

- Visus (cc) (Sehschärfe mit Korrektur) für Nähe (55 und 40 cm) und Ferne (6 m),
- Phorie (Stellung der Augen bzw. Sehachsen),
- Stereopsis (räumliches Sehen),
- Farbensinn und
- Gesichtsfeld.

Die Probanden füllen anschließend einen Fragebogenkatalog mit soziodemografischen Angaben und typischen Confoundern (wie Alter, Geschlecht, Rauchen, Alkoholkonsum, Erkrankungen, Medikamenteneinnahme) sowie bisherigen Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen aus (vgl. A14: User-Test (VR und Real): Soziodemografische Angaben und Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen, ausgenommen Frage 8.1).

Da es sich bei den Teilnehmern nicht um gelernte Montagemitarbeiter handelt, schauen die Probanden zwei jeweils ca. sechsminütige Videos an, in denen sie die Montage des Wegeventils aus zwei verschiedenen Perspektiven sehen. Die erste Perspektive erfasst den gesamten Montagearbeitsplatz (vgl. Abbildung 35), eine zweite Perspektive zeigt eine Nahaufnahme des Wegeventils (vgl. Abbildung 36). Beide Videos enthalten einen Audiokommentar zum Verbrauch der Bauteile.



Abbildung 35: Screenshot aus dem Trainingsvideo (Fernansicht)

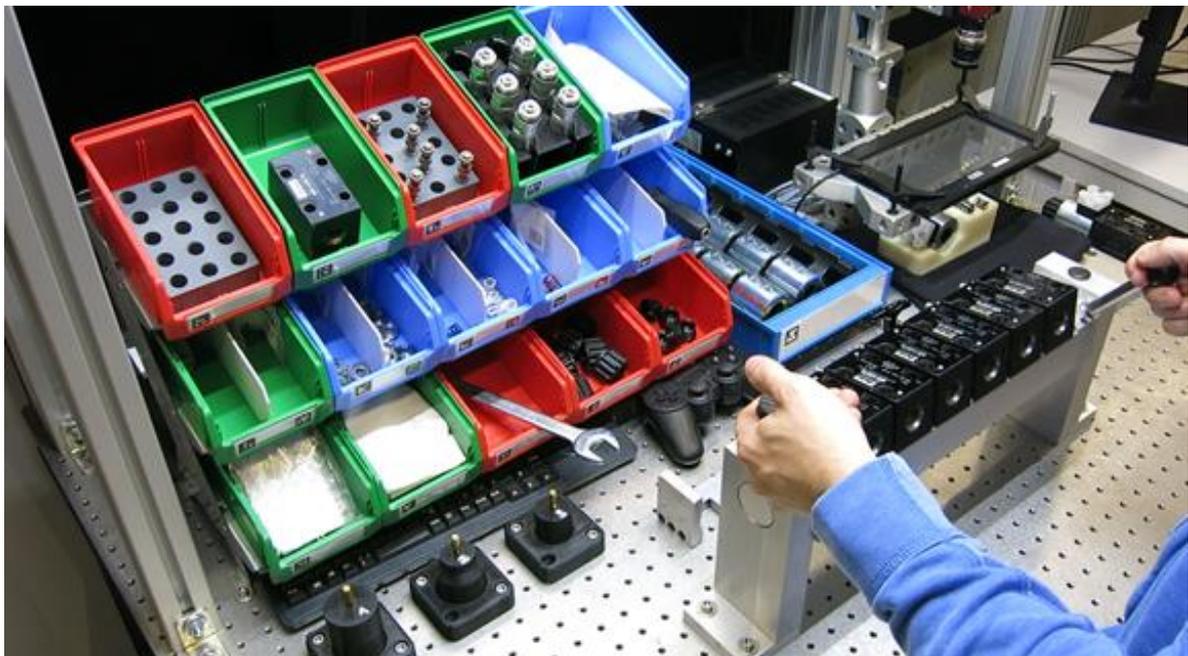


Abbildung 36: Screenshot aus dem Trainingsvideo (Nahansicht)

Es folgt das Anlegen des Langzeit-EKG Rekorder medilog AR12plus.

Direkt am Versuchsstand erhalten die Probanden eine kurze Einweisung in das Assistenzsystem, u. a. darüber, welche Bildschirme und Funktionen vorhanden sind, dass es nicht um eine schnelle Montage, sondern das Kennenlernen des Systems geht, dass Video- und Tonaufnahmen gemacht werden und dass ein besonderer Fokus auf dem Lauten Denken während der Montage liegt.

Während der Montage, die zeitlich nicht begrenzt wurde, wenden die Probanden die Methode des Lauten Denkens an. Es werden – wie bei Parker üblich – sechs Wegeventile gleichzeitig verbaut.

Die Versuchsleiter beobachten im Hintergrund den Montageprozess und führen ein unstrukturiertes Beobachtungsprotokoll. Sie greifen nur dann in den Montageprozess ein, wenn sich die Probanden direkt an die Versuchsleiter wenden bzw. die Probanden ohne Hilfe nicht weiterkommen. Im Protokoll werden auch die Äußerungen der Probanden während des Lauten Denkens notiert. Video und Ton werden während der Montage aufgezeichnet.

Nach der Montage füllen die Probanden die RSME (vgl. A18: Fragebogen zur Rating Scale Mental Effort (RSME)) aus und nehmen an einem qualitativen, leitfadengestützten Kurzinterview (vgl. A23: Interviewleitfaden zum User-Test (Real)) teil.

Der Versuch endet mit einer fünfminütigen Ruhephase im Stehen.

2.5 Statistische Auswertung

Die Daten werden mit SPSS Statistics 26 (Fa. IBM, Armonk, New York, USA) erfasst und ausgewertet. Die Überprüfung der intervallskalierten Daten auf Normalverteilung erfolgt aufgrund der kleinen Stichprobengröße mit dem Shapiro-Wilk-Test. Der Großteil der Variablen ist nicht normalverteilt. Aus diesem Grund werden bei diesen und bei den ordinalskalierten Variablen in der statistischen Auswertung nicht-parametrische Tests verwendet.

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test erfolgt bei zwei abhängigen Stichproben. Es wird bewusst und nach Beratung mit dem Institut für Biometrie und Medizinische Informatik keine händische Bonferroni-Korrektur vorgenommen, da die Studien mit kleiner Stichprobengröße explorativ ausgewertet werden.

Bei mehr als zwei abhängigen Stichproben wird eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung nach Friedman (Rangvarianzanalyse nach Friedman) genutzt. Hier erfolgt im Nachgang ein Post-hoc-Test, der paarweise Vergleiche durchführt. Hierzu wird in SPSS der Dunn-Bonferroni-Test verwendet.

Der Mann-Whitney-U-Test wird bei zwei unabhängigen Stichproben angewendet. Betrachtet wird die exakte Signifikanz (2-seitig).

Da es sich bei der Vorstudie und dem virtuellen User-Test um Crossover-Studiendesigns handelt, werden zudem die zwischen den Simulationen auftretenden Differenzen in linear gemischten Modellen (LGM) mit Simulationseffekt¹⁹, Durchlaufeffekt²⁰, Sequenzeffekt²¹ und Trainingseffekt²² als feste Faktoren und dem Probandeneffekt als zufälligem Faktor betrachtet.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt vorrangig in Tabellenform. Dabei werden zumeist Mittelwert und Standardabweichung ($MW \pm SD$) und bei ordinalskalierten Variablen Median (MD), Minimalwert (Min) und Maximalwert (Max) dargestellt.

Die Testentscheidungen basieren auf einem Signifikanzniveau von 5 %. Für die folgende Beschreibung wird $p > 0,05$ (nicht signifikant; n. s.), $p \leq 0,05$ (signifikant; *), $p \leq 0,01$ (sehr signifikant; **) und $p \leq 0,001$ (höchst signifikant; ***) verwendet. Da in den Versuchen kleine Stichproben untersucht werden, werden auch tendenzielle Unterschiede ($0,05 < p < 0,1$) ausgewiesen (p^\dagger). Bei Ergebnissen, die nicht signifikant sind, wird kein Zeichen verwendet.

Korrelationen zwischen zwei Variablen werden durch den Spearman Korrelationskoeffizienten r beschrieben. Negative Zusammenhänge werden in den folgenden Kapiteln rot, positive Zusammenhänge grün dargestellt. Die Intensität der Farbe entspricht der Stärke der Korrelation (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Legende zu Korrelationstabellen

Legende		positive Korrelationen	negative Korrelationen
sehr geringe Korrelation	$r \leq 0,2$		
geringe Korrelation	$0,2 < r \leq 0,5$		
mittlere Korrelation	$0,5 < r \leq 0,7$		
hohe Korrelation	$0,7 < r \leq 0,9$		
sehr hohe Korrelation	$0,9 < r \leq 1$		

¹⁹ in der Vorstudie Papier- vs. digitale Liste; im User-Test (VR) AR-Konturen vs. Pick-to-Light

²⁰ Durchlauf 1 vs. Durchlauf 2

²¹ in der Vorstudie Papierliste → digitale Liste vs. digitale Liste → Papierliste;
im User-Test (VR) AR-Konturen → Pick-to-Light vs. Pick-to-Light → AR-Konturen

²² gilt nur für den User-Test (VR): Trainingsfilm oder Desktoptraining

3 Ergebnisse

3.1 Vorstudie

Die Ergebnisse der Vorstudie werden im Folgenden dargestellt.

3.1.1 Soziodemografische Angaben und Statusdaten der Stichprobe

Von 24 freiwilligen, klinisch gesunden Studienteilnehmern sind 11 Männer (46 %) und 13 Frauen (54 %). Das durchschnittliche Alter der Probanden liegt bei $25,2 \pm 5,65$ Jahren (Min 19, Max 46). Die Frauen sind im Durchschnitt $24,5 \pm 6,86$ Jahre alt, die Männer $25,9 \pm 3,96$ Jahre alt. Beide Gruppen sind in den soziodemografischen und sozioökonomischen Merkmalen vergleichbar. Die Hälfte der Probanden trägt Kontaktlinsen oder eine Brille. Die Sehleistung (Visus, Phorie, Stereosehen, Farbsehen) ist bei allen Probanden ausreichend bzw. bestkorrigiert, sodass sie am Versuch teilnehmen können. Drei Probanden berichten von Augenerkrankungen. Diese sind: Astigmatismus, Hornhautverkrümmung, Zustand nach Netzhautablösung. Die Probanden verbringen nach eigenen Angaben zwischen 2,5 und 12 Stunden täglich am Bildschirm (im Durchschnitt $6,1 \pm 2,71$ Stunden).

Die Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen finden sich in Abbildung 37.

Haben Sie bereits Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen?

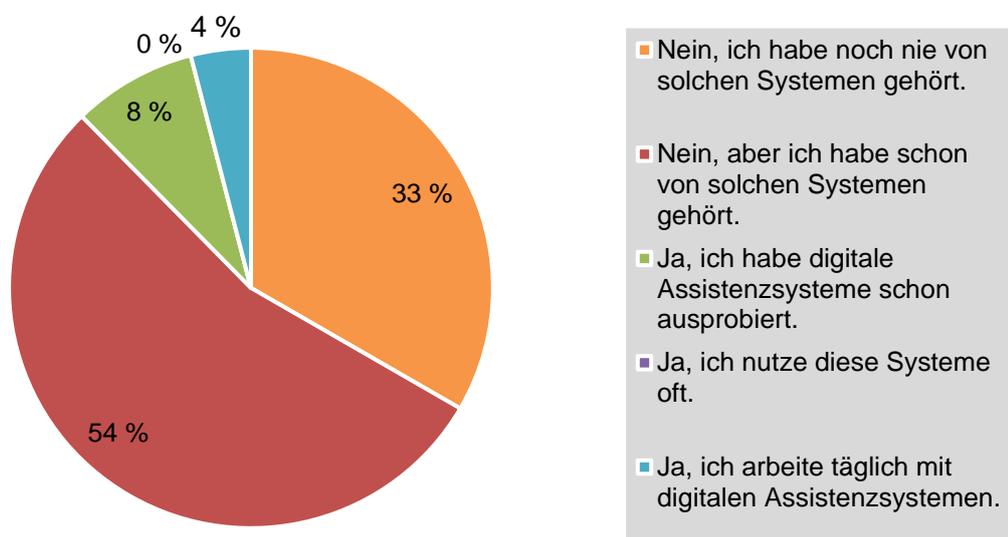


Abbildung 37: Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen (Vorstudie)

Ein Drittel der Probanden nimmt zurzeit Medikamente ein. Davon sind 88 % Frauen ($n = 7$). Die eingenommenen Medikamente sind die Antibabypille, Metoprolol, Enalapril, Amlodipin,

Euthyrox, L-Thyroxin und Ferro sanol²³. Probanden, die Medikamente einnehmen, die für die Fragestellung der Studie nicht relevant sind, werden im Folgenden eingeschlossen. Kein Proband muss aufgrund seines Rauchverhaltens oder Alkoholkonsums aus der Auswertung ausgeschlossen werden.

3.1.2 Objektive physiologische Beanspruchungsdaten

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zwei Probanden aus medizinischen Gründen (> 1 % ventrikuläre Extrasystolen, Einnahme von β -Blockern) und ein Proband aufgrund zahlreicher technischer Artefakte in der EKG-Aufzeichnung für die nachfolgende HRV-Analyse ausgeschlossen werden mussten.

Tabelle 12 stellt die objektiven physiologischen Beanspruchungsdaten anhand der HRV-Parameter im Vergleich der Papierliste und der digitalen Liste des 30-Minuten-Intervalls dar. Bedeutsame Unterschiede werden nicht deutlich.

Tabelle 12: HRV-Parameter bei der Papierliste und bei der digitalen Liste

HRV-Parameter	Papierliste	digitale Liste	pWilcoxon
	MW \pm SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	803,7 \pm 95,23	808,3 \pm 104,78	0,614
SDNN [ms]	67,4 \pm 22,13	68,8 \pm 22,91	0,357
Mean HR [1/min]	76,2 \pm 8,80	76,0 \pm 9,67	0,689
SD HR [1/min]	6,3 \pm 1,22	6,3 \pm 1,27	0,986
RMSSD [ms]	44,3 \pm 22,39	46,4 \pm 27,88	0,434
NN 50 [count]	445,7 \pm 344,21	468,0 \pm 391,04	0,414
pNN 50 [%]	21,0 \pm 17,92	22,5 \pm 20,37	0,434
NN tri index	17,4 \pm 5,70	19,9 \pm 8,65	0,259
TINN [ms]	321,7 \pm 48,97	299,0 \pm 91,38	0,376
frequenzbezogene Parameter			
VLF-Peak [Hz]	< 0,01 \pm < 0,001	< 0,01 \pm 0,009	0,180
LF-Peak [Hz]	0,04 \pm 0,001	0,04 \pm 0,015	0,180
HF-Peak [Hz]	0,19 \pm 0,071	0,20 \pm 0,078	0,263
VLF [ms ²]	2174,1 \pm 1462,04	2271,8 \pm 1174,38	0,476
LF [ms ²]	1686,6 \pm 1218,07	1742,0 \pm 1427,38	0,903
HF [ms ²]	935,7 \pm 1038,98	1050,7 \pm 1419,95	0,821
TP [ms ²]	4796,1 \pm 3294,86	5064,2 \pm 3659,77	0,205
LF [%]	36,6 \pm 10,51	34,4 \pm 9,48	0,274
HF [%]	19,3 \pm 13,09	17,4 \pm 10,50	0,414
LF nu	66,9 \pm 15,86	67,4 \pm 17,40	0,715
HF nu	33,1 \pm 15,86	32,6 \pm 17,40	0,715
LF/HF	3,1 \pm 2,55	3,2 \pm 2,53	0,375
nicht-lineare Parameter			
SD1 [ms]	31,3 \pm 15,83	32,8 \pm 19,72	0,434
SD2 [ms]	89,6 \pm 28,27	91,0 \pm 27,91	0,339
DFA1	1,22 \pm 0,235	1,22 \pm 0,268	0,931
DFA2	0,87 \pm 0,102	0,87 \pm 0,109	0,741

²³ Zum Ausschluss von Daten aufgrund von Medikamenteneinnahme vgl. Abschnitt 3.1.2.

Zum Vergleich mit der Ruhephase, die fünf Minuten umfasst, werden aus den 30-minütigen Arbeitsphasen jeweils fünf Minuten aus der Mitte zum weiteren Vergleich verwendet.

Tabelle 13 zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen der Ruhephase (I) und den Durchläufen mit der Papierliste (II) und der digitalen Liste (III). Ein tendenzieller Unterschied ist zwischen der Ruhephase und der Papierliste bei HF [%] erkennbar.

Tabelle 13: HRV-Parameter bei der Ruhephase, der Papierliste und der digitalen Liste

HRV-Parameter	Ruhephase (I)	Papierliste (II)	digitale Liste (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD				
zeitbezogene Parameter					
Mean NN [ms]	814,0 ± 110,56	804,8 ± 99,32	812,5 ± 108,11	0,405	-
SDNN [ms]	63,8 ± 23,24	59,8 ± 22,20	64,1 ± 23,93	0,368	-
Mean HR [1/min]	75,5 ± 9,71	76,1 ± 9,10	75,6 ± 10,00	0,405	-
SD HR [1/min]	6,0 ± 2,05	5,5 ± 1,38	5,8 ± 1,13	0,867	-
RMSSD [ms]	45,5 ± 23,54	44,0 ± 23,72	46,3 ± 29,79	0,304	-
NN 50 [count]	76,1 ± 56,83	76,0 ± 63,02	76,1 ± 66,16	0,953	-
pNN 50 [%]	21,9 ± 18,60	21,6 ± 19,82	22,2 ± 20,76	1,000	-
frequenzbezogene Parameter					
LF-Peak [Hz]	0,06 ± 0,031	0,05 ± 0,022	0,06 ± 0,033	0,627	-
HF-Peak [Hz]	0,20 ± 0,068	0,20 ± 0,073	0,21 ± 0,074	0,748	-
LF [%]	42,0 ± 18,43	43,5 ± 14,74	42,1 ± 15,11	0,953	-
HF [%]	26,5 ± 17,82	22,3 ± 12,90	19,5 ± 11,80	0,050	I – II (0,062 ^t)
LF nu	57,4 ± 24,92	65,9 ± 19,80	68,2 ± 17,35	0,264	-
HF nu	42,3 ± 24,18	34,1 ± 19,80	31,8 ± 17,35	0,264	-
LF/HF	3,3 ± 3,85	4,3 ± 5,00	3,7 ± 3,57	0,368	-
nicht-lineare Parameter					
SD1 [ms]	32,2 ± 16,67	33,1 ± 17,99	32,8 ± 21,10	0,538	-
SD2 [ms]	83,8 ± 29,85	75,3 ± 32,40	83,9 ± 28,55	0,467	-
DFA1	1,18 ± 0,308	1,19 ± 0,295	1,26 ± 0,290	0,953	-
DFA2	0,77 ± 0,152	0,87 ± 0,170	0,87 ± 0,163	0,102	-

Tabelle 14 zeigt die prozentuale Veränderung der HRV-Parameter im Vergleich der Ruhephase zur digitalen Liste bzw. der Ruhephase zur Papierliste, um die Auslenkungen der Beanspruchungsreaktionen zu verdeutlichen. Anhand des Wilcoxon-Tests kann lediglich bei SD2 ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Mit der Papierliste verringert sich SD2 [ms] um 4,7 %, während sich SD2 [ms] bei der digitalen Liste um 6,3 % erhöht. SDNN [ms] zeigt einen tendenziellen Unterschied, wobei sich SDNN [ms] bei der Papierliste um 2,2 % verringert und bei der digitalen Liste um 5,2 % erhöht.

Tabelle 14: Prozentuale Veränderung der HRV-Parameter für die Papierliste und die digitale Liste

HRV-Parameter	Ruhephase/Papierliste	Ruhephase/digitale Liste	pWilcoxon
	MW ± SD in [%]		
zeitbezogene Parameter			
Δ Mean NN [ms]	-0,7 ± 8,32	0,1 ± 7,09	0,520
Δ SDNN [ms]	-2,2 ± 28,40	5,2 ± 29,40	0,099 ^t
Δ Mean HR [1/min]	1,2 ± 7,99	0,4 ± 6,88	0,455
Δ SD HR [1/min]	-3,0 ± 25,00	3,4 ± 27,95	0,170
Δ RMSSD [ms]	0,3 ± 32,14	1,0 ± 28,98	0,664
Δ NN 50 [count]	21,8 ± 95,14	5,0 ± 64,55	0,931
Δ pNN 50 [%]	24,3 ± 103,26	7,0 ± 66,67	0,958
frequenzbezogene Parameter			
Δ LF-Peak [Hz]	-0,2 ± 51,68	19,9 ± 79,45	0,214
Δ HF-Peak [Hz]	0,6 ± 28,49	7,0 ± 40,69	0,433
Δ LF [%]	23,1 ± 66,54	17,1 ± 57,50	0,434
Δ HF [%]	-5,3 ± 37,28	-17,4 ± 34,09	0,122
Δ LF nu	82,3 ± 280,66	90,0 ± 285,08	0,230
Δ HF nu	-3,2 ± 52,15	-9,8 ± 45,98	0,357
Δ LF/HF	163,1 ± 454,30	92,0 ± 177,17	0,543
nicht-lineare Parameter			
Δ SD1 [ms]	5,8 ± 35,10	1,0 ± 28,98	0,931
Δ SD2 [ms]	-4,7 ± 35,91	6,3 ± 33,10	0,046
Δ DFA1	3,4 ± 25,94	10,7 ± 31,55	0,434
Δ DFA2	18,3 ± 34,06	15,9 ± 27,05	0,664

Tabelle 15 führt die objektiv physiologischen Beanspruchungsdaten anhand der HRV-Parameter im Vergleich des ersten und zweiten, jeweils 30-minütigen, Durchlaufs auf. Insbesondere in den zeitbezogenen und nicht-linearen Parametern können wesentliche Unterschiede zwischen dem ersten und zweiten Durchlauf festgestellt werden. In den zeitbezogenen Parametern zeigen sich durch den Wilcoxon-Test signifikant höhere Werte im zweiten Durchlauf bei Mean NN [ms], SDNN [ms], RMSSD [ms], NN 50 [count] und pNN 50 [%]. Mean HR [1/min] ist im ersten Durchlauf höher als im zweiten Durchlauf. Die frequenzbezogenen Parameter VLF [ms²], HF [ms²] und TP [ms²] sind im zweiten Durchlauf signifikant höher als im ersten. LF nu und HF nu zeigen tendenzielle Unterschiede. SD1 ist im zweiten Durchlauf signifikant höher als im ersten Durchlauf. SD2 ist im ersten Durchlauf signifikant niedriger, während DFA1 im ersten Durchlauf signifikant höher ist.

Tabelle 16 zeigt den Vergleich zwischen der Ruhephase (I) und dem ersten (II) und zweiten Durchlauf²⁴ (III) auf, unabhängig davon, welche Hilfestellung verwendet wurde. Bei dem nicht-linearen Parameter DFA2 ist eine signifikante Erhöhung von der Ruhephase zum ersten Durchlauf festzustellen. Mean NN [ms] und SDNN [ms] sind zwischen der Ruhephase und dem ersten Durchlauf tendenziell unterschiedlich.

²⁴ Da hier Phasen gleicher Dauer verglichen werden, wird für die Montagedurchgänge ein Zeitfenster von 5 Minuten aus der Mitte des 30-Minuten-Intervalls betrachtet.

Tabelle 15: HRV-Parameter bei dem ersten und zweiten Durchlauf

HRV-Parameter	1. Durchlauf	2. Durchlauf	pWilcoxon
	MW ± SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	791,2 ± 104,88	820,8 ± 92,73	0,004
SDNN [ms]	65,8 ± 23,78	70,4 ± 20,94	0,027
Mean HR [1/min]	77,6 ± 9,92	74,5 ± 8,23	0,004
SD HR [1/min]	6,3 ± 1,20	6,3 ± 1,28	0,876
RMSSD [ms]	42,1 ± 26,56	48,6 ± 23,52	0,009
NN 50 [count]	395,0 ± 353,11	518,6 ± 372,76	0,011
pNN 50 [%]	18,8 ± 18,85	24,6 ± 19,08	0,014
NN tri index	17,1 ± 5,31	20,2 ± 8,81	0,181
TINN [ms]	311,4 ± 50,10	309,3 ± 92,22	0,324
frequenzbezogene Parameter			
VLF-Peak [Hz]	< 0,01 ± < 0,001	0,01 ± 0,008	0,317
LF-Peak [Hz]	0,04 ± 0,015	0,04 ± 0,002	0,655
HF-Peak [Hz]	0,19 ± 0,072	0,20 ± 0,764	0,161
VLF [ms ²]	2033,6 ± 1180,90	2412,3 ± 1432,45	0,037
LF [ms ²]	1688,9 ± 1510,05	1739,7 ± 1114,06	0,339
HF [ms ²]	964,3 ± 1449,75	1022,0 ± 999,58	0,042
TP [ms ²]	4686,6 ± 3787,71	5173,7 ± 3133,11	0,039
LF [%]	36,0 ± 9,37	35,1 ± 11,20	0,664
HF [%]	17,4 ± 10,62	18,4 ± 9,98	0,204
LF nu	68,5 ± 15,76	65,8 ± 17,37	0,089 ^t
HF nu	31,5 ± 15,76	34,2 ± 17,37	0,089 ^t
LF/HF	3,3 ± 2,77	2,9 ± 2,28	0,140
nicht-lineare Parameter			
SD1 [ms]	29,8 ± 18,78	34,3 ± 16,64	0,009
SD2 [ms]	87,6 ± 29,47	93,0 ± 26,37	0,050
DFA1	1,26 ± 0,246	1,18 ± 0,251	0,008
DFA2	0,88 ± 0,102	0,86 ± 0,108	0,122

Tabelle 16: HRV-Parameter bei der Ruhephase und dem ersten und zweiten Durchlauf

HRV-Parameter	Ruhephase (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD				
zeitbezogene Parameter					
Mean NN [ms]	814,0 ± 110,56	792,0 ± 105,98	825,4 ± 98,82	0,050	I – II (0,062 ^t)
SDNN [ms]	63,8 ± 23,24	59,8 ± 23,64	64,1 ± 22,51	0,229	-
Mean HR [1/min]	75,5 ± 9,71	77,5 ± 9,99	74,2 ± 8,79	0,050	I – II (0,062 ^t)
SD HR [1/min]	6,0 ± 2,05	5,6 ± 1,11	5,7 ± 1,40	0,953	-
RMSSD [ms]	45,5 ± 23,54	42,3 ± 28,50	48,1 ± 24,96	0,055 ^t	-
NN 50 [count]	76,1 ± 56,83	67,7 ± 62,94	84,4 ± 65,12	0,229	-
pNN 50 [%]	21,9 ± 18,60	19,5 ± 20,28	24,3 ± 20,03	0,304	-
frequenzbezogene Parameter					
LF-Peak [Hz]	0,06 ± 0,031	0,06 ± 0,029	0,06 ± 0,027	0,978	-
HF-Peak [Hz]	0,20 ± 0,068	0,19 ± 0,067	0,21 ± 0,078	0,849	-
LF [%]	42,0 ± 18,43	42,7 ± 13,61	42,9 ± 16,17	0,867	-
HF [%]	26,5 ± 17,82	30,6 ± 12,99	21,2 ± 11,87	0,276	-
LF nu	57,4 ± 24,92	67,7 ± 19,66	66,4 ± 17,55	0,264	-
HF nu	42,3 ± 24,18	32,3 ± 19,66	33,6 ± 17,55	0,264	-
LF/HF	3,3 ± 3,85	4,5 ± 4,98	3,5 ± 3,55	0,368	-
nicht-lineare Parameter					
SD1 [ms]	32,2 ± 16,67	31,8 ± 21,30	34,0 ± 17,68	0,172	-
SD2 [ms]	83,8 ± 29,85	75,7 ± 32,71	83,5 ± 28,31	0,467	-
DFA1	1,18 ± 0,308	1,25 ± 0,322	1,19 ± 0,261	0,717	-
DFA2	0,77 ± 0,152	0,87 ± 0,144	0,87 ± 0,186	0,047	I – II (0,041)

Mithilfe des LGM wurde ermittelt, inwiefern die Hilfestellung (digitale Liste; Papierliste), der Durchlauf (1. Durchlauf; 2. Durchlauf) und die Sequenz (erst digitale Liste, dann Papierliste; erst Papierliste, dann digitale Liste) Einfluss auf die HRV-Daten haben (vgl. Tabelle 17). Bei Mean NN [ms] und Mean HR [1/min] hat der Durchlauf einen signifikanten, bei RMSSD [ms] einen tendenziellen Einfluss. Die Hilfestellung hat tendenziell Einfluss auf HF [%].

Tabelle 17: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die HRV-Daten mittels LGM

	Hilfestellung	Durchlauf	Sequenz
p_{LGM}			
zeitbezogene Parameter			
Δ Mean NN [ms]	0,920	0,002	0,119
Δ SDNN [ms]	0,295	0,474	0,290
Δ Mean HR [1/min]	0,828	0,002	0,153
Δ SD HR [1/min]	0,181	0,482	0,759
Δ RMSSD [ms]	0,869	0,093 ^t	0,385
Δ NN 50 [count]	0,392	0,180	0,766
Δ pNN 50 [count]	0,401	0,163	0,995
frequenzbezogene Parameter			
Δ LF-Peak [Hz]	0,167	0,731	0,156
Δ HF-Peak [Hz]	0,591	0,260	0,755
Δ LF [%]	0,423	0,826	0,568
Δ HF [%]	0,091 ^t	0,351	0,210
Δ LF nu	0,272	0,977	0,210
Δ HF nu	0,439	0,365	0,271
Δ LF/HF	0,536	0,444	0,900
nicht-lineare Parameter			
Δ SD1 [ms]	0,529	0,362	0,658
Δ SD2 [ms]	0,146	0,381	0,354
Δ DFA1	0,136	0,384	0,614
Δ DFA2	0,663	0,812	0,693

3.1.3 Subjektive Beanspruchungsdaten

Im Folgenden werden die Ergebnisse des VFQ, der EZ-Skala und des NASA-TLX beschrieben.

VFQ

Zwischen der Messung vor dem Versuch (I), der Anwendung der Papierliste (II) und der digitalen (III) Arbeitsanweisung zeigen sich im Friedman-Test mit anschließendem Post-hoc-Test keine signifikanten Unterschiede in der Ausprägung der visuellen Beschwerden und Ermüdung (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: VFQ-Beschwerden vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste

Beschwerde [Punkte]	vorher (I)	Papierliste (II)	digitale Liste (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD MD (Min – Max)				
Trockene Augen (Trock A)	3,0 ± 2,29 2,5 (1 – 8)	2,5 ± 2,06 1 (1 – 7)	2,5 ± 1,89 2 (1 – 7)	0,472	-
Tränende Augen (Trän A)	1,2 ± 0,48 1 (1 – 3)	1,2 ± 0,38 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,49 1 (1 – 3)	0,779	-
Die Augen sind gereizt oder brennen (A gereizt brenn)	2,5 ± 2,20 1,5 (1 – 10)	2,1 ± 1,59 1 (1 – 6)	2,2 ± 1,81 1 (1 – 7)	0,485	-
Schmerzen in oder um die Augen (Schmerz A)	1,8 ± 2,08 1 (1 – 10)	1,4 ± 1,06 1 (1 – 5)	1,5 ± 1,06 1 (1 – 5)	0,309	-
Schwere Augen (Schwere A)	2,3 ± 1,70 1,5 (1 – 6)	1,8 ± 1,24 1 (1 – 5)	2,0 ± 1,63 1 (1 – 8)	0,138	-
Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können (Schw Linien verf) ⁺	1,2 ± 0,66 1 (1 – 4)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	0,050	-
Schwierigkeiten scharf zu sehen (Schw scharf sehen)	1,5 ± 1,06 1 (1 – 5)	1,1 ± 0,34 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,34 1 (1 – 2)	0,102	-
Springender Text (Spring Text) ⁺	1,1 ± 0,34 1 (1 – 2)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	0,050	-
Verschwommene Buchstaben (Verschw Buchst)	1,3 ± 0,53 1 (1 – 3)	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	0,030	-
Blendung durch Lichter (Blend d Licht)	1,3 ± 0,62 1 (1 – 3)	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,28 1 (1 – 2)	0,074 ^t	-
Verschwommene Sicht (Verschw Sicht)	1,3 ± 0,68 1 (1 – 4)	1,2 ± 0,48 1 (1 – 3)	1,2 ± 0,48 1 (1 – 3)	0,852	-
Doppelsehen (Doppels) ⁺	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,000	-
Kopfschmerzen (Kopfschm)	1,8 ± 1,23 1 (1 – 5)	2,0 ± 1,78 1 (1 – 8)	1,9 ± 1,47 1 (1 – 7)	0,104	-
Nackenschmerzen (Nackenschm)	1,8 ± 1,39 1 (1 – 7)	1,9 ± 1,23 1,5 (1 – 6)	1,8 ± 1,56 1 (1 – 8)	0,332	-
Übelkeit (Übelk)	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	0,368	-
Geistige Ermüdung (G Ermüd)	1,8 ± 1,11 1 (1 – 5)	2,4 ± 1,66 1,5 (1 – 6)	2,6 ± 1,56 3 (1 – 6)	0,087 ^t	-

^t: aufgrund konstanter Werte sind die Ergebnisse bedingt aussagekräftig

Auch im zeitlichen Verlauf lassen sich nach Friedman-Test und Post-Hoc-Test keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Phasen feststellen (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: VFQ-Beschwerden vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf

Beschwerde [Punkte]	vorher (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	p _{Friedman}	p _{Bonferroni}
	MW ± SD MD (Min – Max)				
Trockene Augen	3,0 ± 2,29 2,5 (1 – 8)	2,5 ± 1,93 2 (1 – 7)	2,5 ± 2,02 1 (1 – 7)	0,459	-
Tränende Augen	1,2 ± 0,48 1 (1 – 3)	1,2 ± 0,48 1 (1 – 3)	1,1 ± 0,34 1 (1 – 2)	0,779	-
Die Augen sind gereizt oder brennen	2,5 ± 2,20 1,5 (1 – 10)	2,2 ± 1,81 1 (1 – 7)	2,1 ± 1,59 1 (1 – 6)	0,381	-
Schmerzen in oder um die Augen	1,8 ± 2,08 1 (1 – 10)	1,4 ± 1,02 1 (1 – 5)	1,5 ± 1,10 1 (1 – 5)	0,676	-
Schwere Augen	2,3 ± 1,70 1,5 (1 – 6)	2,1 ± 1,72 1 (1 – 2)	1,8 ± 1,10 1 (1 – 4)	0,168	-
Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können ⁺	1,2 ± 0,66 1 (1 – 4)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	0,050	-
Schwierigkeiten scharf zu sehen	1,5 ± 1,06 1 (1 – 5)	1,1 ± 0,34 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,34 1 (1 – 2)	0,102	-
Springender Text ⁺	1,1 ± 0,34 1 (1 – 2)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	0,050	-
Verschwommene Buchstaben	1,3 ± 0,53 1 (1 – 3)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	0,030	-
Blendung durch Lichter	1,3 ± 0,62 1 (1 – 3)	1,1 ± 0,28 1 (1 – 2)	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	0,074 ^t	-
Verschwommene Sicht	1,3 ± 0,68 1 (1 – 4)	1,1 ± 0,45 1 (1 – 3)	1,2 ± 0,51 1 (1 – 3)	0,756	-
Doppelsehen ⁺	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,000	-
Kopfschmerzen	1,8 ± 1,23 1 (1 – 5)	1,9 ± 1,47 1 (1 – 7)	2,0 ± 1,78 1 (1 – 8)	0,104	-
Nackenschmerzen	1,8 ± 1,39 1 (1 – 7)	1,9 ± 1,57 1 (1 – 8)	1,8 ± 1,22 1 (1 – 6)	0,285	-
Übelkeit	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	0,368	-
Geistige Ermüdung	1,8 ± 1,11 1 (1 – 5)	2,6 ± 1,66 2,5 (1 – 6)	2,4 ± 1,56 2 (1 – 6)	0,087 ^t	-

*: aufgrund konstanter Werte sind die Ergebnisse bedingt aussagekräftig

Tabelle 20 zeigt die prozentuale Veränderung der visuellen Beschwerden im Vergleich der Ruhephase zur digitalen Liste bzw. der Ruhephase zur Papierliste, um die Auslenkungen der Beanspruchungsreaktionen zu verdeutlichen. Anhand des Wilcoxon-Tests können keine signifikanten Unterschiede in den prozentualen Veränderungen festgestellt werden. Jedoch zeigt sich bei „Schmerzen in oder um die Augen“ tendenziell eine Verringerung bei der Papierliste und eine Erhöhung bei der digitalen Liste.

Tabelle 20: Prozentuale Veränderung der VFQ-Beschwerden für die Papierliste und die digitale Liste

Beschwerde	vorher/Papierliste	vorher/digitale Liste	p _{Wilcoxon}
	MW ± SD in [%]		
Δ Trockene Augen	-5,2 ± 44,09	1,8 ± 59,91	0,445
Δ Tränende Augen	5,6 ± 32,10	-0,7 ± 17,36	0,276
Δ Die Augen sind gereizt oder brennen	-1,7 ± 50,35	2,6 ± 69,16	0,596
Δ Schmerzen in oder um die Augen	-6,7 ± 25,48	8,3 ± 56,16	0,078 ^t
Δ Schwere Augen	-7,2 ± 41,76	11,1 ± 73,71	0,153
Δ Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können	-7,3 ± 20,16	-7,3 ± 20,16	1,000
Δ Schwierigkeiten scharf zu sehen	-9,2 ± 35,77	-9,2 ± 35,77	1,000
Δ Springender Text	-6,3 ± 16,89	-6,3 ± 16,89	1,000
Δ Verschwommene Buchstaben	-6,9 ± 31,82	-11,1 ± 22,34	0,317
Δ Blendung durch Lichter	-9,7 ± 22,48	-5,6 ± 31,72	0,317
Δ Verschwommene Sicht	5,2 ± 51,06	7,3 ± 55,89	0,680
Δ Doppelsehen ⁺	0,0 ± 0,00	0,0 ± 0,00	1,000
Δ Kopfschmerzen	13,6 ± 39,77	11,4 ± 32,70	0,581
Δ Nackenschmerzen	18,2 ± 44,40	9,6 ± 43,92	0,320
Δ Übelkeit [*]	0,0 ± 0,00	-2,1 ± 10,21	0,317
Δ Geistige Ermüdung	56,0 ± 124,88	85,2 ± 145,10	0,268

*: aufgrund konstanter Werte sind die Ergebnisse bedingt aussagekräftig

Auch mit dem LGM können keine signifikanten Einflüsse von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die subjektiven visuellen Beschwerden festgestellt werden (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die VFQ-Beschwerden mittels LGM

	Hilfestellung	Durchlauf	Sequenz
	p _{LGM}		
Δ Trockene Augen	0,449	0,398	0,940
Δ Tränende Augen	0,414	0,681	0,386
Δ Die Augen sind gereizt oder brennen	0,614	0,758	0,540
Δ Schmerzen in oder um die Augen	0,570	0,895	0,455
Δ Schwere Augen	0,665	0,330	0,625
Δ Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können	-	-	-
Δ Schwierigkeiten scharf zu sehen	1,000	1,000	0,781
Δ Springender Text	-	-	-
Δ Verschwommene Buchstaben	0,328	0,328	0,406
Δ Blendung durch Lichter	0,328	0,328	0,467
Δ Verschwommene Sicht	0,729	0,305	0,687
Δ Doppelsehen	-	-	-
Δ Kopfschmerzen	0,873	0,873	0,499
Δ Nackenschmerzen	0,189	0,547	0,994
Δ Übelkeit	0,323	0,323	0,323
Δ Geistige Ermüdung	0,158	0,303	0,550

EZ-Skala

Zwischen der Anwendung der Papierliste (II) und der digitalen Arbeitsanweisung (III) zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der situationsgebundenen Motivations- und Beanspruchungslage (vgl. Tabelle 22). Vergleicht man die Daten zwischen der EZ-Skala vorher (I), mit der Papierliste (II) und mit der digitalen Liste (III), findet man bei fünf der 14 Binärfaktoren mit dem Friedman-Test signifikante Unterschiede. Mit dem nachfolgenden Post-hoc-Test wird deutlich, dass jedoch lediglich in der Anstrengungsbereitschaft (ANBE) der Wert vor Beginn des Versuchs signifikant größer ist, verglichen mit der Beurteilung nach dem Durchlauf mit der Papierliste. Aktivierung (AKT) und Kontaktbereitschaft (KON) zeigen tendenzielle Unterschiede auf.

Tabelle 22: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste

Binärfaktor [Stanine]	vorher (I)	Papierliste (II)	digitale Liste (III)	p_{Friedman}	$p_{\text{Bonferroni}}$
	MW \pm SD MD (Min – Max)				
EZ100 (MOT)	5,9 \pm 1,57 5,5 (3 – 9)	5,2 \pm 2,17 5 (1 – 9)	5,1 \pm 1,94 5,5 (1 – 9)	0,029	-
EZ200 (BEA)	6,3 \pm 1,33 6 (3 – 9)	5,8 \pm 1,70 6 (3 – 9)	5,9 \pm 1,83 6 (2 – 9)	0,090 ^t	-
EZ110 (AKT)	5,7 \pm 1,65 5,5 (2 – 8)	4,9 \pm 2,11 5 (1 – 9)	5,1 \pm 1,89 5 (1 – 9)	0,016	I – II (0,052 ^t)
EZ120 (EFF)	5,8 \pm 1,77 6 (2 – 9)	5,5 \pm 2,11 5,5 (1 – 9)	5,4 \pm 1,81 5 (1 – 9)	0,278	-
EZ210 (TEN)	5,7 \pm 1,46 5 (3 – 8)	5,3 \pm 1,39 5 (2 – 8)	5,3 \pm 1,39 5 (2 – 8)	0,245	-
EZ220 (DEF)	6,4 \pm 1,50 6 (4 – 9)	6,3 \pm 1,68 6 (4 – 9)	6,2 \pm 1,55 6 (4 – 9)	0,981	-
EZ111 (ANBE)	6,3 \pm 1,73 6 (3 – 9)	5,3 \pm 2,16 5 (1 – 9)	5,6 \pm 1,89 5,5 (2 – 9)	0,005	I – II (0,028)
EZ112 (KON)	4,4 \pm 1,44 4 (2 – 8)	3,7 \pm 1,20 4 (2 – 7)	3,6 \pm 1,35 3 (1 – 7)	0,007	I – III (0,052 ^t)
EZ121 (SOZ)	6,0 \pm 1,49 6 (3 – 9)	5,5 \pm 1,87 6 (1 – 9)	5,5 \pm 1,61 6 (1 – 8)	0,020	-
EZ122 (SICH)	5,4 \pm 1,98 5,5 (1 – 9)	5,3 \pm 2,27 5 (2 – 9)	5,3 \pm 1,88 5 (2 – 9)	0,738	-
EZ211 (STIM)	5,5 \pm 1,41 5 (3 – 8)	5,3 \pm 1,33 5 (3 – 8)	5,2 \pm 1,47 5 (2 – 8)	0,437	-
EZ212 (SPAN)	5,7 \pm 1,52 5 (3 – 9)	5,5 \pm 1,47 5 (3 – 9)	5,5 \pm 1,50 5,5 (2 – 9)	0,291	-
EZ221 (ERH)	6,5 \pm 1,44 6,5 (4 – 9)	6,4 \pm 1,47 6 (4 – 9)	6,3 \pm 1,49 6 (4 – 9)	0,983	-
EZ222 (SCHL)	6,2 \pm 1,90 6 (3 – 9)	5,8 \pm 1,96 5 (3 – 9)	5,9 \pm 1,67 5 (4 – 9)	0,580	-

Tabelle 23 zeigt im zeitlichen Verlauf in den gleichen Binärfaktoren wie Tabelle 22 signifikante Unterschiede im Friedman-Test. Diese sind mit dem Post-Hoc-Test jedoch nicht mehr signifikant nachweisbar. Bei der Aktivierung (AKT) und Anstrengungsbereitschaft (ANBE) bleiben die Unterschiede tendenziell erkennbar.

Tabelle 23: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf

Binärfaktor [Stanine]	vorher (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD MD (Min – Max)				
EZ100 (MOT)	5,9 ± 1,57 5,5 (3 – 9)	5,3 ± 2,10 5 (1 – 9)	5,0 ± 2,00 5,5 (1 – 9)	0,031	-
EZ200 (BEA)	6,3 ± 1,33 6 (3 – 9)	5,8 ± 1,74 6 (2 – 9)	5,8 ± 1,79 6 (3 – 9)	0,389	-
EZ110 (AKT)	5,7 ± 1,65 5,5 (2 – 8)	5,2 ± 1,98 5 (1 – 9)	4,8 ± 2,01 5 (1 – 8)	0,023	I – III (0,091 ^t)
EZ120 (EFF)	5,8 ± 1,77 6 (2 – 9)	5,5 ± 2,04 5 (1 – 9)	5,3 ± 1,88 5,5 (1 – 9)	0,331	-
EZ210 (TEN)	5,7 ± 1,46 5 (3 – 8)	5,1 ± 1,42 5 (2 – 8)	5,4 ± 1,35 5 (2 – 8)	0,094 ^t	-
EZ220 (DEF)	6,4 ± 1,50 6 (4 – 9)	6,4 ± 1,64 6 (4 – 9)	6,1 ± 1,59 6 (4 – 9)	0,557	-
EZ111 (ANBE)	6,3 ± 1,73 6 (3 – 9)	5,7 ± 1,64 6 (4 – 9)	5,3 ± 2,11 5 (1 – 9)	0,007	I – II (0,091 ^t) I – III (0,052 ^t)
EZ112 (KON)	4,4 ± 1,44 4 (2 – 8)	3,6 ± 1,25 4 (1 – 7)	3,6 ± 1,31 3,5 (2 – 7)	0,009	-
EZ121 (SOZ)	6,0 ± 1,49 6 (3 – 9)	5,6 ± 1,77 6 (1 – 9)	5,4 ± 1,72 6 (1 – 8)	0,013	-
EZ122 (SICH)	5,4 ± 1,98 5,5 (1 – 9)	5,2 ± 2,09 5 (2 – 9)	5,4 ± 2,08 5 (2 – 9)	0,103	-
EZ211 (STIM)	5,5 ± 1,41 5 (3 – 8)	5,2 ± 1,47 5 (2 – 8)	5,3 ± 1,33 5 (3 – 8)	0,334	-
EZ212 (SPAN)	5,7 ± 1,52 5 (3 – 9)	5,3 ± 1,51 5 (2 – 9)	5,8 ± 1,42 5,5 (3 – 9)	0,056 ^t	-
EZ221 (ERH)	6,5 ± 1,44 6,5 (4 – 9)	6,5 ± 1,56 6 (4 – 9)	6,2 ± 1,38 6 (4 – 9)	0,805	-
EZ222 (SCHL)	6,2 ± 1,90 6 (3 – 9)	6,0 ± 1,83 5,5 (4 – 9)	5,6 ± 1,79 5 (3 – 9)	0,146	-

Der relative Differenzvergleich der Binärfaktoren (vgl. Tabelle 24) lässt keine Unterschiede erkennen.

Tabelle 24: Prozentuale Veränderung der Binärfaktoren der EZ-Skala für die Papierliste und die digitale Liste

Binärfaktor	vorher/Papierliste	vorher/digitale Liste	pWilcoxon
	MW ± SD in [%]		
Δ EZ100 (MOT)	-13,2 ± 24,82	-13,0 ± 26,76	1,000
Δ EZ200 (BEA)	-7,8 ± 19,89	-3,8 ± 29,27	0,198
Δ EZ110 (AKT)	-15,1 ± 26,15	-10,5 ± 25,62	0,367
Δ EZ120 (EFF)	-7,2 ± 20,62	-5,1 ± 27,52	0,610
Δ EZ210 (TEN)	-5,9 ± 19,52	-5,2 ± 22,15	0,833
Δ EZ220 (DEF)	-1,1 ± 16,71	-0,6 ± 25,66	0,592
Δ EZ111 (ANBE)	-15,4 ± 23,90	-9,5 ± 23,40	0,209

Binärfaktor	vorher/Papierliste	vorher/digitale Liste	p _{Wilcoxon}
	MW ± SD in [%]		
Δ EZ112 (KON)	-10,8 ± 32,81	-14,5 ± 31,78	0,532
Δ EZ121 (SOZ)	-8,8 ± 21,62	-7,7 ± 21,60	0,645
Δ EZ122 (SICH)	1,0 ± 31,17	6,9 ± 38,49	0,275
Δ EZ211 (STIM)	-1,8 ± 20,05	-3,2 ± 21,12	0,953
Δ EZ212 (SPAN)	-0,7 ± 25,92	0,2 ± 31,74	0,806
Δ EZ221 (ERH)	0,1 ± 20,84	-0,4 ± 25,77	0,878
Δ EZ222 (SCHL)	-4,3 ± 22,68	1,3 ± 31,07	0,286

Im LGM (vgl. Tabelle 25) zeigen sich signifikante Einflüsse der Sequenz (erst digitale Liste, dann Papierliste bzw. erst Papierliste, dann digitale Liste) auf die Motivation (MOT), die Aktivierung (AKT) und die Anstrengungsbereitschaft (ANBE) und tendenzielle Einflüsse auf die Kontaktbereitschaft (KON). Der Durchlauf wirkt sich tendenziell auf die Spannungslage (SPAN) aus.

Tabelle 25: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die subjektiven Motivations- und Beanspruchungslage mittels LGM

	Hilfestellung	Durchlauf	Sequenz
	p _{LGM}		
Δ EZ100 (MOT)	0,960	0,521	0,033
Δ EZ200 (BEA)	0,360	0,984	0,132
Δ EZ110 (AKT)	0,487	0,425	0,027
Δ EZ120 (EFF)	0,661	0,961	0,109
Δ EZ210 (TEN)	0,843	0,183	0,611
Δ EZ220 (DEF)	0,895	0,388	0,178
Δ EZ111 (ANBE)	0,329	0,417	0,042
Δ EZ112 (KON)	0,516	0,971	0,057 ^t
Δ EZ121 (SOZ)	0,644	0,173	0,354
Δ EZ122 (SICH)	0,401	0,243	0,683
Δ EZ211 (STIM)	0,767	0,786	0,194
Δ EZ212 (SPAN)	0,835	0,053 ^t	0,954
Δ EZ221 (ERH)	0,874	0,414	0,225
Δ EZ222 (SCHL)	0,283	0,447	0,368

NASA-TLX

Die Auswertung des NASA-TLX zeigt für beide Instruktionsvarianten ähnliche Punktwerte (Papierliste $58,4 \pm 11,76$ Punkte; digitale Liste $57,4 \pm 19,19$ Punkte; $p_{\text{Wilcoxon}} = 0,732$). Im zeitlichen Vergleich sinken die Werte jedoch signifikant ($60,8 \pm 14,76$ im ersten Durchlauf zu $55,0 \pm 16,47$ Punkten im zweiten Durchlauf; $p_{\text{Wilcoxon}} = 0,021$). Dieses Ergebnis zeigt sich auch durch das LGM. Hier kann ein signifikanter Einfluss des Durchlaufs ($p_{\text{LGM}} = 0,039$) auf den NASA-TLX festgestellt werden. Hilfestellung und Sequenz wirken sich im LGM nicht signifikant aus.

3.1.4 Objektive Leistungsdaten

Die Reaktionszeiten (Mittelwert: MW_RZ und Medianwert: MD_RZ), Fehlerzahl, Auslassungen und Ausreißer des Aufmerksamkeitstests „Augenbewegung“ im Vergleich vorher (I), nach dem Durchlauf mit der Papierliste (II) und nach dem Durchlauf mit der digitalen Liste (III) sind in Tabelle 26 und Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 26 zeigt, dass lediglich für den Bereich „Gap Mitte“ signifikante (und tendenzielle) Unterschiede in der Reaktionszeit zwischen der Testung vor den Montagedurchläufen (I) und nach der Montage (II und III) bestehen. Die Reaktionszeiten sind vor Beginn des Versuchs höher als nach den Durchläufen mit Papier- und digitaler Liste. Signifikante Unterschiede zwischen der Papierliste und der digitalen Liste bestehen nicht.

Tabelle 26: Reaktionszeiten vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste

Variable [ms]	vorher (I)	Papierliste (II)	digitale Liste (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW \pm SD				
MW_RZ					
Gap links	588,5 \pm 71,71	590,4 \pm 72,88	587,4 \pm 62,44	0,582	-
Gap Mitte	525,7 \pm 57,14	502,2 \pm 65,45	503,1 \pm 63,99	0,011	I – II (0,018) I – III (0,042)
Gap rechts	581,4 \pm 56,74	588,8 \pm 72,17	586,4 \pm 63,23	0,927	-
Overlap links	627,0 \pm 67,39	641,0 \pm 78,51	637,4 \pm 83,26	0,882	-
Overlap Mitte	608,6 \pm 107,06	579,4 \pm 60,79	613,9 \pm 130,12	0,409	-
Overlap rechts	627,4 \pm 58,02	628,3 \pm 66,01	631,5 \pm 63,32	0,338	-
gesamt	586,8 \pm 56,12	587,2 \pm 62,11	585,4 \pm 62,89	0,722	-
MD_RZ					
Gap links	585,8 \pm 72,72	585,5 \pm 78,09	578,3 \pm 61,33	0,928	-
Gap Mitte	516,7 \pm 58,21	492,0 \pm 61,67	498,3 \pm 64,92	0,008	I – II (0,012) I – III (0,063 ^t)
Gap rechts	574,5 \pm 52,85	579,8 \pm 62,52	578,8 \pm 65,60	0,969	-
Overlap links	616,8 \pm 58,06	626,5 \pm 69,90	634,5 \pm 81,92	0,515	-
Overlap Mitte	570,8 \pm 68,94	562,6 \pm 60,08	576,5 \pm 80,29	0,167	-
Overlap rechts	624,9 \pm 67,38	619,2 \pm 62,05	628,2 \pm 61,61	0,311	-
gesamt	580,7 \pm 52,39	579,0 \pm 58,83	580,5 \pm 57,74	0,747	-

Tabelle 27 führt an, dass es keine deutlichen Unterschiede im Post-hoc-Test in der Anzahl der Fehler, Auslassungen und Ausreißer zwischen dem Aufmerksamkeitstest vorher (I), der Anwendung der Papierliste (II) und der digitalen Liste (III) gibt.

Tabelle 27: Fehleranzahl, Auslassungen, Ausreißer vorher, bei der Papierliste und bei der digitalen Liste

Variable	vorher (I)	Papierliste (II)	digitale Liste (III)	p_{Friedman}	$p_{\text{Bonferroni}}$
	MW \pm SD MD (Min – Max)				
Fehleranzahl					
Gap links	0,5 \pm 0,66 0 (0 – 2)	0,3 \pm 0,48 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,45 0 (0 – 2)	0,073 ^t	-
Gap Mitte	0 \pm 0,20 0 (0 – 1)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0,368	-
Gap rechts	0,4 \pm 0,83 0 (0 – 3)	0,3 \pm 0,53 0 (0 – 2)	0,1 \pm 0,34 0 (0 – 1)	0,433	-
Overlap links	0,3 \pm 0,61 0 (0 – 2)	0,4 \pm 0,77 0 (0 – 3)	0,4 \pm 0,71 0 (0 – 3)	0,494	-
Overlap Mitte	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	1,000	-
Overlap rechts	0,1 \pm 0,28 0 (0 – 1)	0,3 \pm 0,44 0 (0 – 1)	0,2 \pm 0,51 0 (0 – 2)	0,179	-
gesamt	1,3 \pm 1,42 0 (0 – 5)	1,2 \pm 1,25 1 (0 – 4)	0,8 \pm 0,96 0,5 (0 – 3)	0,703	-
Auslassungen					
Gap links	0 \pm 0,20 0 (0 – 1)	0,0 \pm 0,20 0 (0 – 1)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0,607	-
Gap Mitte	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	1,000	-
Gap rechts	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	1,000	-
Overlap links	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0,1 \pm 0,28 0 (0 – 1)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0,135	-
Overlap Mitte	0,4 \pm 0,58 0 (0 – 2)	0,3 \pm 0,44 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,45 0 (0 – 2)	0,058 ^t	-
Overlap rechts	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0,0 \pm 0,20 0 (0 – 1)	0 \pm 0 0 (0 – 0)	0,368	-
gesamt	0,5 \pm 0,66 0 (0 – 2)	0,4 \pm 0,78 0 (0 – 3)	0,1 \pm 0,45 0 (0 – 2)	0,080	-
Ausreißer					
Gap links	0 \pm 0,20 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,28 0 (0 – 1)	0,0 \pm 0,20 0 (0 – 1)	0,779	-
Gap Mitte	0,1 \pm 0,28 0 (0 – 1)	0,3 \pm 0,46 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,34 0 (0 – 1)	0,122	-
Gap rechts	0,1 \pm 0,34 0 (0 – 1)	0,2 \pm 0,38 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,28 0 (0 – 1)	0,717	-
Overlap links	0 \pm 0,20 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,34 0 (0 – 1)	0,2 \pm 0,38 0 (0 – 1)	0,417	-
Overlap Mitte	0,3 \pm 0,44 0 (0 – 1)	0,3 \pm 0,48 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,34 0 (0 – 1)	0,257	-
Overlap rechts	0,2 \pm 0,42 0 (0 – 1)	0,1 \pm 0,28 0 (0 – 1)	0,2 \pm 0,42 0 (0 – 1)	0,325	-
gesamt	1,5 \pm 0,88 1,5 (0 – 4)	1,2 \pm 0,76 1 (0 – 3)	1,5 \pm 0,98 1 (0 – 3)	0,250	-

Im Vergleich der Differenzwerte²⁵ der Reaktionszeiten (MW_RZ und MD_RZ), Fehlerzahl, Auslassungen und Ausreißer zwischen dem Aufmerksamkeitstest vor dem Versuch und jeweils nach dem Durchlauf mit der Papierinstruktion bzw. digitalen Instruktion zeigen sich ebenfalls keine statistisch gesicherten Unterschiede. In den Ausreißern ist ein tendenzieller Unterschied erkennbar (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Veränderung der objektiven Leistungsdaten für die Papierliste und die digitale Liste

Differenzvariable	vorher/Papierliste	vorher/digitale Liste	pWilcoxon
	MW ± SD		
Δ gesamt MW_RZ	-0,4 ± 46,96	1,4 ± 31,79	0,841
Δ gesamt MD_RZ	1,7 ± 47,67	0,2 ± 28,37	0,432
Δ gesamt Fehlerzahl	0,0 ± 1,46	0,4 ± 1,50	0,275
Δ gesamt Auslassung	0,0 ± 0,91	0,3 ± 0,64	0,107
Δ gesamt Ausreißer	0,4 ± 1,10	0,0 ± 1,22	0,083 ^t

In Tabelle 29 und Tabelle 30 sind die Reaktionszeiten (MW_RZ und MD_RZ), Fehlerzahl, Auslassungen und Ausreißer des Aufmerksamkeitstests im Vergleich vorher (I), nach dem ersten Durchlauf (II) und nach dem zweiten Durchlauf (III) dargestellt.

In Tabelle 29 wird eine signifikante Verringerung der Reaktionszeit von (I) zu (III) für den Bereich „Gap mitte“ sowohl bei MW_RZ als auch bei MD_RZ sowie eine Verringerung der Reaktionszeit vom ersten zum zweiten Durchlauf bei Overlap links deutlich.

Tabelle 29: Reaktionszeiten vorher, bei dem ersten und bei dem zweiten Durchlauf

Variable	vorher (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD				
MW_RZ					
Gap links	588,5 ± 71,71	588,4 ± 70,71	589,4 ± 64,92	0,747	-
Gap Mitte	525,7 ± 57,14	507,6 ± 62,01	497,7 ± 66,96	0,004	I – III (0,003)
Gap rechts	581,4 ± 56,74	595,7 ± 69,64	579,5 ± 64,99	0,330	-
Overlap links	627,0 ± 67,39	648,6 ± 84,06	629,8 ± 76,50	0,115	-
Overlap Mitte	608,6 ± 107,06	599,0 ± 106,74	594,3 ± 99,21	0,506	-
Overlap rechts	627,4 ± 58,02	629,4 ± 64,91	630,5 ± 64,48	0,969	-
gesamt	586,8 ± 56,12	591,2 ± 64,03	581,4 ± 60,54	0,090 ^t	-
MD_RZ					
Gap links	585,8 ± 72,72	579,5 ± 73,06	584,3 ± 67,35	0,512	-
Gap Mitte	516,7 ± 58,21	502,8 ± 59,54	487,6 ± 66,14	0,002	I – III (0,002)
Gap rechts	574,5 ± 52,85	587,5 ± 66,57	571,1 ± 60,33	0,192	-
Overlap links	616,8 ± 58,06	643,1 ± 83,46	617,9 ± 65,84	0,011	II – III (0,009)
Overlap Mitte	570,8 ± 68,94	570,4 ± 70,86	568,7 ± 71,65	0,959	-
Overlap rechts	624,9 ± 67,38	624,8 ± 65,72	622,6 ± 58,02	0,582	-
gesamt	580,7 ± 52,39	584,7 ± 59,28	574,8 ± 56,83	0,061 ^t	-

²⁵ Hier wurden absolute Differenzwerte verwendet, da Fehler, Auslassungen und Ausreißer teilweise den Wert 0 aufwiesen.

Tabelle 30 wiederum zeigt nach dem Post-hoc-Test keine Unterschiede in der Fehlerzahl, den Auslassungen und Ausreißern zwischen der Messung vorher (I), nach dem ersten (II) und zweiten (III) Durchlauf.

Tabelle 30: Fehleranzahl, Auslassungen, Ausreißer vorher, bei dem ersten und bei dem zweiten Durchlauf

Variable	vorher (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD MD (Min – Max)				
Fehleranzahl					
Gap links	0,5 ± 0,66 0 (0 – 2)	0,2 ± 0,42 0 (0 – 1)	0,3 ± 0,53 0 (0 – 2)	0,266	-
Gap Mitte	0 ± 0,20 0 (0 – 1)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0,368	-
Gap rechts	0,4 ± 0,83 0 (0 – 3)	0,1 ± 0,34 0 (0 – 1)	0,3 ± 0,53 0 (0 – 2)	0,509	-
Overlap links	0,3 ± 0,61 0 (0 – 2)	0,5 ± 0,89 0 (0 – 3)	0,3 ± 0,53 0 (0 – 2)	0,239	-
Overlap Mitte	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0 0 (0 – 0)	1,000	-
Overlap rechts	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0,1 ± 0,34 0 (0 – 1)	0,3 ± 0,57 0 (0 – 2)	0,042	-
gesamt	1,3 ± 1,42 0 (0 – 5)	1,0 ± 1,08 0 (0 – 3)	1,1 ± 1,18 0 (0 – 4)	0,703	-
Auslassung					
Gap links	0 ± 0,20 0 (0 – 1)	0 ± 0,20 0 (0 – 1)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0,607	-
Gap Mitte	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0 0 (0 – 0)	1,000	-
Gap rechts	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0 0 (0 – 0)	1,000	-
Overlap links	0 ± 0 0 (0 – 0)	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0,135	-
Overlap Mitte	0,4 ± 0,58 0 (0 – 2)	0,3 ± 0,55 0 (0 – 2)	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0,023	-
Overlap rechts	0 ± 0 0 (0 – 0)	0 ± 0,20 0 (0 – 1)	0 ± 0 0 (0 – 0)	0,368	-
gesamt	0,5 ± 0,66 0 (0 – 2)	0,5 ± 0,83 0 (0 – 3)	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0,029	-
Ausreißer					
Gap links	0 ± 0,20 0 (0 – 1)	0 ± 0,20 0 (0 – 1)	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0,779	-
Gap Mitte	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0,3 ± 0,44 0 (0 – 1)	0,2 ± 0,38 0 (0 – 1)	0,301	-
Gap rechts	0,1 ± 0,34 0 (0 – 1)	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0,2 ± 0,38 0 (0 – 1)	0,717	-
Overlap links	0 ± 0,20 0 (0 – 1)	0,2 ± 0,42 0 (0 – 1)	0,1 ± 0,28 0 (0 – 1)	0,197	-
Overlap Mitte	0,3 ± 0,44 0 (0 – 1)	0,3 ± 0,44 0 (0 – 1)	0,2 ± 0,42 0 (0 – 1)	0,931	-
Overlap rechts	0,2 ± 0,42 0 (0 – 1)	0,1 ± 0,34 0 (0 – 1)	0,2 ± 0,38 0 (0 – 1)	0,687	-
gesamt	1,5 ± 0,88 1,5 (0 – 4)	1,3 ± 0,92 0 (0 – 3)	1,4 ± 0,88 1 (0 – 3)	0,559	-

Mit dem LGM (vgl. Tabelle 31) ergibt sich ein signifikanter Einfluss des Durchlaufs auf die Anzahl der Auslassungen. Die Hilfestellung wirkt sich tendenziell auf die Anzahl der Auslassungen und die Ausreißer aus.

Tabelle 31: Einfluss von Hilfestellung, Durchlauf und Sequenz auf die objektiven Leistungsdaten mittels LGM

	Hilfestellung	Durchlauf	Sequenz
	p_{LGM}		
Δ gesamt MW_RZ	0,839	0,273	0,733
Δ gesamt MD_RZ	0,858	0,228	0,937
Δ gesamt Fehlerzahl	0,250	0,698	0,585
Δ gesamt Auslassung	0,083 ^t	0,029	0,651
Δ gesamt Ausreißer	0,090 ^t	0,846	0,634

3.1.5 Usability-Daten

Am Ende des Versuchs wurden die Probanden gefragt, mit welcher Hilfestellung sie zukünftig lieber arbeiten wollen. 33 % der Probanden würden zukünftig vorzugsweise mit der Papierliste und 46 % mit der digitalen Liste arbeiten wollen. 21 % der Probanden kreuzten „ist mir egal / weiß nicht“ an (vgl. Abbildung 38).

Der Exakte Test nach Fisher deutet daraufhin, dass die Favoritenwahl nicht dadurch beeinflusst wird, ob jemand den Versuch mit der digitalen oder der Papierliste begonnen hat ($p_{Fisher} = 0,136$), jedoch scheinen die Probanden eher die Hilfestellung vorzuziehen, mit der sie im zweiten Durchlauf gearbeitet haben.

Mit welcher Hilfestellung würden Sie zukünftig lieber arbeiten wollen?

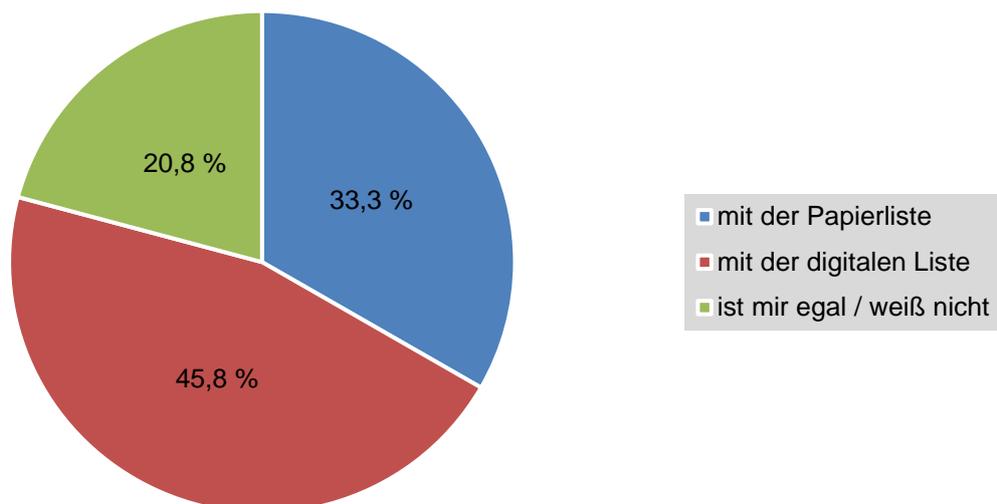


Abbildung 38: Favorisierte Hilfestellung (Vorstudie)

Die Ergebnisse aus der SUS zeigen statistisch vergleichbare Werte bei beiden Varianten (für die Papierliste $71,4 \pm 15,18$ Punkte und die digitale Variante $69,1 \pm 20,42$ Punkte; $p_{\text{Wilcoxon}} = 0,577$). Im LGM zeigen Hilfestellung und Sequenz keinen signifikanten Einfluss, jedoch wirkt sich der Durchlauf signifikant ($p_{\text{LGM}} = 0,013$) auf die Gebrauchstauglichkeit aus.

3.1.6 Korrelationsanalysen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg

Die signifikanten Korrelationskoeffizienten für die Papierliste und die digitale Liste sind den folgenden Tabellen zu entnehmen²⁶. Freie Zellen bedeuten, dass keine signifikanten Korrelationen vorliegen.

In Tabelle 32 werden die HRV-Daten mit den objektiven Leistungsdaten, den subjektiven (visuellen) Beanspruchungsdaten (EZ-Skala, VFQ und NASA-TLX) und SUS für die Papierliste auf Korrelationen überprüft. Zwischen den objektiven Leistungsdaten und den HRV-Parametern zeigen sich vier signifikante Korrelationen. Der höchste Korrelationskoeffizient findet sich bei der Reaktionszeit (MW) und Mean NN [ms] ($r = -0,511^*$). Zwischen den visuellen Beschwerden, erhoben durch den VFQ, fallen insbesondere signifikante Korrelationen bei „Kopfschmerzen“ zu den HRV-Parametern auf. Die höchsten Korrelationskoeffizienten zeigen sich bei LF nu, HF nu und LF/HF. Zwischen der EZ-Skala und den HRV-Parametern fallen insbesondere positive Korrelationen auf.

In Tabelle 33 werden die HRV-Daten mit den objektiven Leistungsdaten, den subjektiven (visuellen) Beanspruchungsdaten (EZ-Skala, VFQ und NASA-TLX) und SUS für die digitale Liste auf Korrelationen überprüft. Es sind keine signifikanten Korrelationen zwischen objektiven Leistungsdaten und HRV-Parametern zu finden. Bei den visuellen Beschwerden korreliert, wie bei der Papierliste, v. a. „Kopfschmerzen“ mit den HRV-Parametern und bei der EZ-Skala sind ebenfalls einige Korrelationen zu den HRV-Parametern zu finden. Anders als bei der Papierliste sind bei der digitalen Liste ein negativer Zusammenhang zwischen dem NASA-TLX und HF [ms²] sowie vier signifikante positive Korrelationen zwischen dem SUS-Score und den HRV-Parametern erkennbar.

In Tabelle 34 und Tabelle 35 finden sich signifikante Korrelationen zwischen den Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten im Augenbewegungs-Test. Insbesondere zwischen den Ausreißern und den Binärfaktoren der EZ-Skala können schwache bis mittlere negative Korrelationen beschrieben werden.

²⁶ Bei allen Berechnungen wurden absolute Werte verwendet. Bei den HRV-Daten wurden 30 min. Intervalle verwendet. Bei den TAP-Daten werden zur besseren Übersicht nur die Gesamtwerte dargestellt, nicht die Ergebnisse für die einzelnen Gesichtsfelder und Gap bzw. Overlap.

In Tabelle 36 und Tabelle 37 sind Korrelationen zwischen dem SUS-Score als Maß für die Usability und die Erhebungsinstrumente zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung dargestellt.

Zusammenhänge zwischen der SUS, als Maß der Gebrauchstauglichkeit, und dem TAP-Test, zur Messung der objektiven Leistungsdaten wurden untersucht (vgl. Tabelle 38). Lediglich bei der digitalen Liste kann zwischen der Gebrauchstauglichkeit und den Ausreißern ein schwacher negativer Zusammenhang ermittelt werden. Auf eine Darstellung zur Papierliste wird aufgrund fehlender signifikanter Zusammenhänge verzichtet.

In Tabelle 39 und Tabelle 40 sind Korrelationen zwischen dem VFQ und der EZ-Skala, zwei Befragungsinstrumenten zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung, dargestellt. Hier zeigen sich zwischen dem VFQ und der EZ-Skala einige schwache bis mittlere negative Korrelationen. Der höchste Korrelationskoeffizient ist sowohl bei der Papierliste als auch bei der digitalen Liste zwischen der VFQ-Beschwerde „Kopfschmerzen“ und dem Binärfaktor „Erholtheit“ erkennbar. Korrelationen zwischen NASA-TLX zum VFQ und zur EZ-Skala werden für die Papierliste und digitale Liste untersucht, jedoch können keine signifikanten Zusammenhänge gefunden werden.

Tabelle 32: Korrelationen für die Papierliste (HRV vs. objektive Leistungsdaten in TAP, VFQ, EZ-Skala, NASA-TLX und SUS)

Papier	zeitbezogene Parameter									frequenzbezogene Parameter											nicht-lineare Parameter					
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	NN tri index	TINN [ms]	VLF-Peak [Hz]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	VLF [ms ²]	LF [ms ²]	HF [ms ²]	TP [ms ²]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2	
TAP																										
Reaktionszeit MW [ms]	-0,511*		0,507*																							
Reaktionszeit M [ms]	-0,474*		0,469*																							
Fehleranzahl																										
Auslassungen																										
Ausreißer																										
VFQ																										
Trock A																										
Trän A								0,564**																		
A gereiz brenn																										
Schmerz A																										
Schwere A																										
Schw Linien verf																										
Schw scharf sehen																										
Spring Text																										
Verschw Buchst																										
Blend d Licht																										

Papier	zeitbezogene Parameter									frequenzbezogene Parameter											nicht-lineare Parameter				
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	NN tri index	TINN [ms]	VLF-Peak [Hz]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	VLF [ms ²]	LF [ms ²]	HF [ms ²]	TP [ms ²]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
Verschw Sicht																									0,433*
Doppels																									
Kopfschm																		0,444*	-0,454*	0,454*	-0,454*				-0,450*
Nackenschm																									
Übelk																									
G Ermüd																									
EZ-Skala																									
MOT		0,561**						0,491*					0,607**			0,551*								0,551**	
BEA		0,509*		0,467*				0,545*					0,476*			0,510*								0,497*	
AKT		0,593**		0,553**				0,440*	0,632**				0,559**			0,573**								0,568**	
EFF	0,488*	0,517*	-0,466*										0,541*			0,528*								0,528*	
TEN		0,483*											0,502*			0,457*								0,458*	
DEF																									
ANBE		0,548*		0,569**					0,569**				0,499*			0,541*								0,522*	
KON																									
SOZ																									
SICH	0,527*	0,531*	-0,500*										0,589**			0,524*								0,524*	
STIM		0,442*											0,501*			0,442*								0,434*	
SPAN																									
ERH																									
SCHL																									

Papier	zeitbezogene Parameter									frequenzbezogene Parameter											nicht-lineare Parameter					
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	NN tri index	TINN [ms]	VLF-Peak [Hz]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	VLF [ms ²]	LF [ms ²]	HF [ms ²]	TP [ms ²]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2	
NASA-TLX																										
NASA-TLX																										
SUS																										
SUS																										

Tabelle 33: Korrelationen für die digitale Liste (HRV vs. objektive Leistungsdaten in TAP, VFQ, EZ-Skala, NASA-TLX und SUS)

digital	zeitbezogene Parameter									frequenzbezogene Parameter											nicht-lineare Parameter					
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	NN tri index	TINN [ms]	VLF-Peak [Hz]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	VLF [ms ²]	LF [ms ²]	HF [ms ²]	TP [ms ²]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2	
TAP																										
Reaktionszeit MW [ms]																										
Reaktionszeit M [ms]																										
Fehleranzahl																										
Auslassungen																										
Ausreißer																										
VFQ																										
Trock A																										
Trän A																										
A gereiz brenn																										

digital	zeitbezogene Parameter									frequenzbezogene Parameter											nicht-lineare Parameter					
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	NN tri index	TINN [ms]	VLF-Peak [Hz]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	VLF [ms ²]	LF [ms ²]	HF [ms ²]	TP [ms ²]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2	
Schmerz A																										
Schwere A																										
Schw Linien verf																										
Schw scharf sehen																										
Spring Text																										
Verschw Buchst																										
Blend d Licht																										
Verschw Sicht																										
Doppels																										
Kopfschm																		0,457*	-0,452*	0,452*	-0,452*					
Nackenschm											0,474*															
Übelk																										
G Ermüd																										
EZ-Skala																										
MOT												0,450*														
BEA																										
AKT																										
EFF												0,546*			0,474*											
TEN	0,493*				0,558**	0,552**	0,534*	0,460*															0,558**	0,476*		
DEF																										

digital	zeitbezogene Parameter									frequenzbezogene Parameter											nicht-lineare Parameter				
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	NN tri index	TINN [ms]	VLF-Peak [Hz]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	VLF [ms ²]	LF [ms ²]	HF [ms ²]	TP [ms ²]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
ANBE																									
KON					0,485*	0,520*	0,506*																0,485*		
SOZ	0,461*	0,478*	-0,484*					0,495*					0,445*			0,470*								0,522*	
SICH																									
STIM																									
SPAN		0,534*			0,587**	0,561**	0,556**	0,594**					0,594**		0,467*	0,505*							0,587**	0,477*	
ERH																									
SCHL																									
NASA-TLX																									
NASA-TLX																									
SUS																									
SUS					0,486*	0,467*	0,433*								0,451*								0,486*		

Tabelle 34: Korrelationen für die Papierliste (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten in TAP)

Papier	TAP				
	Reaktionszeit MW [ms]	Reaktionszeit M [ms]	Fehleranzahl	Auslassungen	Ausreißer
VFQ					
Trock A					
Trän A					
A gereiz brenn					
Schmerz A					
Schwere A			-0,436*		
Schw Linien verf					
Schw scharf sehen					
Spring Text					
Verschw Buchst					
Blend d Licht					
Verschw Sicht					
Doppels					
Kopfschm					
Nackenschm					
Übelk					
G Ermüd					
EZ-Skala					
MOT					
BEA					-0,473*
AKT					
EFF					-0,496*
TEN					-0,517**
DEF					
ANBE					
KON					
SOZ					-0,403*
SICH					
STIM			0,447*		-0,602**
SPAN				-0,434*	
ERH					-0,406*
SCHL					
NASA-TLX					
NASA-TLX					

Tabelle 35: Korrelationen für die digitale Liste (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten in TAP)

digital	TAP				
	Reaktionszeit MW [ms]	Reaktionszeit M [ms]	Fehleranzahl	Auslassungen	Ausreißer
VFQ					
Trock A					
Trän A					
A gereiz brenn					
Schmerz A					
Schwere A					
Schw Linien verf					
Schw scharf sehen					
Spring Text					
Verschw Buchst					
Blend d Licht					
Verschw Sicht					
Doppels					
Kopfschm					
Nackenschm					
Übelk					
G Ermüd					
EZ-Skala					
MOT					-0,494*
BEA					-0,500*
AKT					-0,454*
EFF					
TEN					-0,626**
DEF					
ANBE					-0,546**
KON					-0,406*
SOZ					
SICH					-0,496*
STIM					-0,577**
SPAN					-0,508*
ERH					
SCHL					
NASA-TLX					
NASA-TLX					

Tabelle 39: Korrelationen für die Papierliste (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)

Papier		VFQ															
		Trock A	Trän A	A gereiz brenn	Schmerz A	Schwere A	Schw Lin-nien verf	Schw scharf se-hen	Spring Text	Verschw Buchst	Blend d Licht	Verschw Sicht	Doppels	Kopfschm	Nacken-schm	Übelk	G Ermüd
EZ-Skala	MOT																
	BEA											-0,406*		-0,503*			
	AKT																
	EFF																
	TEN																
	DEF				-0,470*							-0,468*		-0,590**			
	ANBE				-0,420*							-0,417*		-0,415*			
	KON																
	SOZ																
	SICH														-0,433*		
	STIM																
	SPAN																
	ERH	-0,457*		-0,480*	-0,482*							-0,418		-0,663***	-0,420*		
	SCHL				-0,488*							-0,550**		-0,577**			

Tabelle 40: Korrelationen für die digitale Liste (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)

digital		VFQ																
		Trock A	Trän A	A gereiz brenn	Schmerz A	Schwere A	Schw Li-nien verf	Schw scharf se-hen	Spring Text	Verschw Buchst	Blend d Licht	Verschw Sicht	Doppels	Kopfschm	Nacken-schm	Übelk	G Ermüd	
EZ-Skala	MOT																	
	BEA																	
	AKT																	
	EFF																	
	TEN		-0,421*															
	DEF	-0,411*												-0,494*				
	ANBE																	
	KON																	
	SOZ		-0,432*												-0,419*			
	SICH																	
	STIM		-0,407*															
	SPAN								-0,420*									
	ERH														-0,522**			
SCHL	-0,412*													-0,481*			-0,427*	

3.2 User-Test (VR)

Die Ergebnisse des virtuellen User-Tests werden im Folgenden dargestellt.

3.2.1 Soziodemografische Angaben und Statusdaten der Stichprobe

Von 25 freiwilligen, klinisch gesunden Studienteilnehmern sind 13 Männer (52 %) und 12 Frauen (48 %). Das durchschnittliche Alter der Probanden liegt bei $26,8 \pm 8,93$ Jahren (Min 21, Max 59). Die Frauen sind im Durchschnitt $25,9 \pm 10,54$ Jahre alt, die Männer $27,6 \pm 7,49$ Jahre alt. In beiden Gruppen ist der sozioökonomische Status vergleichbar. 14 Probanden tragen Kontaktlinsen oder eine Brille. Die Sehleistung (Visus, Phorie, Stereosehen, Farbsehen, Gesichtsfeld) ist bei allen Probanden ausreichend bzw. bestkorrigiert, sodass sie am Versuch teilnehmen können. Vier der 25 Probanden berichten von weiteren Augenerkrankungen. Diese sind: dreimal Hornhautverkrümmung, einmal Myopia und Astigmatismus. Die Probanden verbringen nach eigenen Angaben zwischen einer und 12 Stunden täglich am Bildschirm (im Durchschnitt $5,4 \pm 2,88$ Stunden).

Die Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen finden sich in Abbildung 39.

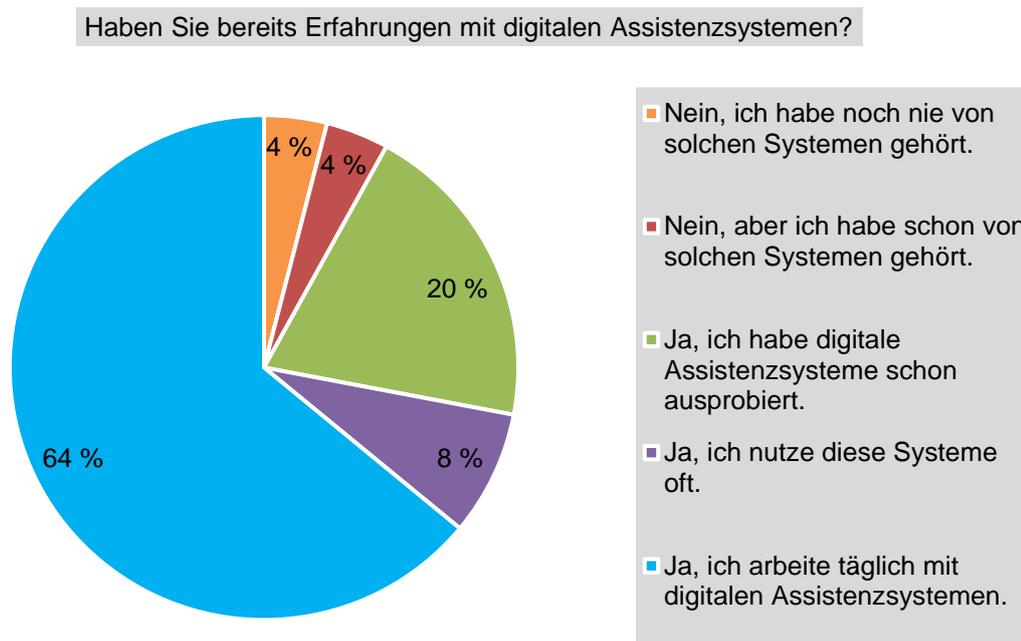


Abbildung 39: Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen (User-Test VR)

Des Weiteren hatten 52 % der Probanden ($n = 13$) vor dem Test keinerlei Erfahrungen mit VR-Brillen. 48 % haben VR-Brillen bereits kurz ausprobiert (z. B. im Rahmen von anderen Forschungsstudien oder im Gaming-Bereich).

Drei (12 %) der 25 Probanden geben an, dass sie zurzeit unter körperlichen Beschwerden leiden. Alle drei waren männlich. Die berichteten körperlichen Beschwerden sind leichte Schulterprobleme, leichte Rückenschmerzen und gebrochener linker kleiner Finger. Auf Nachfrage geben die Probanden an, sich physisch und psychisch gesund genug für die Durchführung des Versuchs zu fühlen.

Sieben Probanden (28 %) nehmen zurzeit Medikamente ein. Davon sind 71 % Frauen (n = 5). Die eingenommenen Medikamente sind die Antibabypille, Cetirizin, L-Thyroxin, Schlafmittel und Cortison zum Inhalieren. Probanden, die Medikamente einnehmen, die für die Fragestellung der Studie nicht relevant sind, werden im Folgenden eingeschlossen. Kein Proband muss aufgrund seines Rauchverhaltens oder Alkoholkonsums aus der folgenden Auswertung ausgeschlossen werden. Laut Anamnese leidet kein Proband an Bluthochdruck, Diabetes mellitus oder einer Herzrhythmusstörung.

3.2.2 Objektive physiologische Beanspruchungsdaten

Die folgenden vier Tabellen vergleichen die objektive physiologische Beanspruchung anhand der zeitbezogenen HRV-Parameter für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System.

Tabelle 41: HRV-Parameter bei dem Wegeventil vor dem Puzzle mit AR-Konturen und Pick-to-Light

HRV-Parameter	Wegeventil vor dem Puzzle mit AR	Wegeventil vor dem Puzzle mit PtL	pWilcoxon
	MW ± SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	753,8 ± 136,31	749,9 ± 118,9	0,819
SDNN [ms]	45,4 ± 18,27	46,5 ± 18,13	0,767
Mean HR [1/min]	82,3 ± 14,19	82,3 ± 13,25	0,840
SD HR [1/min]	4,8 ± 1,93	5,0 ± 1,81	0,657
RMSSD [ms]	31,5 ± 17,14	30,8 ± 17,22	0,628
NN 50 [count]	9,1 ± 9,22	8,9 ± 10,78	0,538
pNN 50 [%]	12,7 ± 15,22	12,0 ± 15,53	0,466

Tabelle 42: HRV-Parameter bei dem Wegeventil nach dem Puzzle mit AR-Konturen und Pick-to-Light

HRV-Parameter	Wegeventil nach dem Puzzle mit AR	Wegeventil nach dem Puzzle mit PtL	pWilcoxon
	MW ± SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	750,6 ± 118,74	750,0 ± 118,52	0,875
SDNN [ms]	45,2 ± 18,65	44,3 ± 18,27	0,977
Mean HR [1/min]	82,2 ± 13,36	82,3 ± 13,40	0,886
SD HR [1/min]	4,9 ± 2,25	4,7 ± 1,74	0,954
RMSSD [ms]	29,1 ± 14,88	29,2 ± 16,10	0,284
NN 50 [count]	7,5 ± 9,11	7,7 ± 9,74	0,775
pNN 50 [%]	10,2 ± 13,43	10,6 ± 14,78	0,985

Tabelle 43: HRV-Parameter bei dem Wegeventil vor und nach dem Puzzle mit AR-Konturen

HRV-Parameter	Wegeventil vor dem Puzzle mit AR	Wegeventil nach dem Puzzle mit AR	pWilcoxon
	MW \pm SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	753,8 \pm 136,31	750,6 \pm 118,74	0,979
SDNN [ms]	45,4 \pm 18,27	45,2 \pm 18,65	0,882
Mean HR [1/min]	82,3 \pm 14,19	82,2 \pm 13,36	0,861
SD HR [1/min]	4,8 \pm 1,93	4,9 \pm 2,25	0,677
RMSSD [ms]	31,5 \pm 17,14	29,1 \pm 14,88	0,123
NN 50 [count]	9,1 \pm 9,22	7,5 \pm 9,11	0,035
pNN 50 [%]	12,7 \pm 15,22	10,2 \pm 13,43	0,045

Tabelle 44: HRV-Parameter bei dem Wegeventil vor und nach dem Puzzle mit Pick-to-Light

HRV-Parameter	Wegeventil vor dem Puzzle mit PtL	Wegeventil nach dem Puzzle mit PtL	pWilcoxon
	MW \pm SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	749,9 \pm 118,9	750,0 \pm 118,52	0,798
SDNN [ms]	46,5 \pm 18,13	44,3 \pm 18,27	0,339
Mean HR [1/min]	82,3 \pm 13,25	82,3 \pm 13,40	0,882
SD HR [1/min]	5,0 \pm 1,81	4,7 \pm 1,74	0,339
RMSSD [ms]	30,8 \pm 17,22	29,2 \pm 16,10	0,211
NN 50 [count]	8,9 \pm 10,78	7,7 \pm 9,74	0,273
pNN 50 [%]	12,0 \pm 15,53	10,6 \pm 14,78	0,263

Zwischen den beiden Modalitäten können keine signifikanten Unterschiede gefunden werden (vgl. Tabelle 41 und Tabelle 42).

Tabelle 43 zeigt im Wilcoxon-Test einen signifikant höheren Wert bei NN 50 [count] und pNN 50 [%] bei der Montage des ersten Ventils. Tabelle 44 zeigt keine deutlichen Unterschiede.

Für die Auswertung der Arbeitsphasen im Vergleich und der Ruhephase im Vergleich mit den Arbeitsphasen müssen drei der 25 Probanden ausgeschlossen werden. Bei einem Probanden dauerte der zweite Montagedurchlauf unter fünf Minuten, bei einem Probanden gab es Systemabstürze der VR-Software, die zu größeren Pausen im Montageprozess und damit einer Verzerrung der HRV-Ergebnisse führen würden und bei einem Probanden wurde eine fehlerhafte Einstellung in den simulierten Assistenzsystemen vorgenommen. Somit gilt für die Tabellen 45, 46, 48, 49 und 50 $n = 22$.

Im Vergleich des fünfminütigen Intervalls der beiden simulierten Varianten zeigt sich im Wilcoxon-Test ein signifikanter Unterschied bei LF/HF. LF/HF ist bei den AR-Konturen größer als bei dem Pick-to-Light-System. Zudem sind LF nu und HF nu tendenziell unterschiedlich (vgl. Tabelle 45).

Tabelle 45: HRV-Parameter bei den AR-Konturen und dem Pick-to-Light-System

HRV-Parameter	AR	PtL	pWilcoxon
	MW ± SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	750,8 ± 126,46	750,4 ± 120,01	0,858
SDNN [ms]	50,6 ± 16,84	50,0 ± 16,39	0,833
Mean HR [1/min]	82,4 ± 13,75	82,4 ± 13,21	0,910
SD HR [1/min]	5,4 ± 1,47	5,4 ± 1,56	0,702
RMSSD [ms]	31,0 ± 17,38	31,1 ± 16,45	0,987
NN 50 [count]	42,3 ± 46,13	44,9 ± 48,31	0,888
pNN 50 [%]	11,6 ± 14,61	12,0 ± 14,25	0,856
frequenzbezogene Parameter			
LF-Peak [Hz]	0,06 ± 0,021	0,05 ± 0,023	0,724
HF-Peak [Hz]	0,20 ± 0,084	0,20 ± 0,083	0,917
LF [%]	41,3 ± 14,66	38,6 ± 16,34	0,306
HF [%]	47,2 ± 14,74	47,7 ± 15,95	0,685
LF nu	79,6 ± 10,89	77,1 ± 12,59	0,091 ^t
HF nu	20,4 ± 10,89	22,9 ± 12,59	0,091 ^t
LF/HF	5,8 ± 4,13	5,0 ± 3,43	0,039
nicht-lineare Parameter			
SD1 [ms]	21,9 ± 12,81	21,9 ± 11,52	0,935
SD2 [ms]	67,7 ± 21,90	66,8 ± 21,40	0,897
DFA1	1,38 ± 0,242	1,37 ± 0,247	0,592
DFA2	0,87 ± 0,209	0,85 ± 0,192	0,673

Im Vergleich zwischen dem ersten und zweiten Durchlauf (vgl. Tabelle 46), ergeben sich signifikante Unterschiede in den Parametern Mean NN [ms], Mean HR [1/min], LF-Peak [Hz] und HF [%]. Bei Mean NN [ms] sind die Werte im ersten Durchlauf geringer, bei Mean HR [1/min], LF-Peak [Hz] und HF [%] im zweiten Durchlauf. LF [%] und LF/HF sind tendenziell unterschiedlich.

Tabelle 46: HRV-Parameter bei dem ersten und zweiten Durchlauf

HRV-Parameter	1. Durchlauf	2. Durchlauf	pWilcoxon
	MW ± SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	741,7 ± 119,68	759,5 ± 126,13	< 0,001
SDNN [ms]	50,2 ± 15,89	50,4 ± 17,31	0,651
Mean HR [1/min]	83,3 ± 13,35	81,6 ± 13,56	0,001
SD HR [1/min]	5,5 ± 1,52	5,3 ± 1,51	0,259
RMSSD [ms]	30,8 ± 16,09	31,3 ± 17,72	0,649
NN 50 [count]	42,1 ± 44,00	45,1 ± 50,25	0,888
pNN 50 [%]	11,2 ± 13,21	12,4 ± 15,54	0,559

HRV-Parameter	1. Durchlauf	2. Durchlauf	pWilcoxon
	MW ± SD		
frequenzbezogene Parameter			
LF-Peak [Hz]	0,06 ± 0,025	0,05 ± 0,017	0,028
HF-Peak [Hz]	0,19 ± 0,082	0,20 ± 0,085	0,917
LF [%]	37,6 ± 17,24	42,3 ± 13,29	0,082 ^t
HF [%]	50,0 ± 16,81	44,9 ± 13,25	0,027
LF nu	79,4 ± 11,15	77,3 ± 12,40	0,135
HF nu	20,6 ± 11,15	22,7 ± 12,40	0,135
LF/HF	5,7 ± 4,09	5,0 ± 3,48	0,088 ^t
nicht-lineare Parameter			
SD1 [ms]	21,7 ± 11,25	22,1 ± 12,43	0,626
SD2 [ms]	67,1 ± 20,90	67,3 ± 22,38	0,615
DFA1	1,38 ± 0,257	1,37 ± 0,231	0,733
DFA2	0,86 ± 0,233	0,86 ± 0,162	0,833

Tabelle 47 stellt die drei fünfminütigen Ruhephasen des User-Tests vergleichend gegenüber. In den zeitbezogenen Parametern zeigen sich bei Mean NN [ms] signifikant geringere Werte in der Ruhephase vorher ohne VR, verglichen mit den zwei weiteren Ruhephasen. SDNN [ms] ist in der Ruhephase nachher ohne VR signifikant höher als in den anderen beiden Ruhephasen. Mean HR [1/min] ist in der ersten Ruhephase vorher ohne VR (I) signifikant höher verglichen mit der Ruhephase vorher mit VR (II). Die frequenzbezogenen Parameter verdeutlichen Unterschiede bei LF nu, HF nu und LF/HF. Bei LF nu und LF/HF zeigt sich der geringste Wert bei (I). Bei HF nu ist bei (I) der höchste Wert zu finden. In den nicht-linearen Parametern zeigen SD2 [ms] und DFA1 bei (III) den signifikant höchsten Wert.

Im Vergleich der Ruhephase vorher (ohne VR) und der Ruhephase vorher (mit VR) lassen sich in den HRV-Parametern nur zwei signifikante Unterschiede feststellen (Mean NN [ms] und Mean HR [1/min]). Bei Mean NN [ms] ist der Wert bei (II) größer, bei Mean HR [1/min] ist der Wert bei (I) größer.

Da es sich bei der Ruhephase nachher ohne VR-Brille (III) am ehesten um eine tatsächliche Ruhe- bzw. Erholungsphase handelt, wird dieses Ruheintervall als Vergleichswert für die folgenden Berechnungen verwendet. Sie wird im Folgenden nur mit dem Begriff „Ruhephase“ betitelt.

Tabelle 47: HRV-Parameter bei den drei Ruhephasen

HRV-Parameter	Ruhephase vorher ohne VR (I)	Ruhephase vorher mit VR (II)	Ruhephase nachher ohne VR (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD				
zeitbezogene Parameter					
Mean NN [ms]	700,5 ± 124,54	713,2 ± 114,86	724,7 ± 124,47	0,013	I – III (0,033) I – II (0,033)
SDNN [ms]	55,1 ± 24,61	54,3 ± 18,32	61,8 ± 20,54	0,005	I – III (0,006) II – III (0,049)
Mean HR [1/min]	88,8 ± 15,64	86,7 ± 13,71	85,5 ± 13,51	0,024	I – II (0,033)
SD HR [1/min]	6,5 ± 2,28	6,2 ± 1,75	7,0 ± 1,88	0,103	-
RMSSD [ms]	29,0 ± 17,41	29,6 ± 16,95	31,6 ± 19,07	0,261	-
NN 50 [count]	40,7 ± 52,87	43,2 ± 55,99	43,5 ± 50,71	0,989	-
pNN 50 [%]	10,4 ± 15,41	11,1 ± 15,43	11,6 ± 15,77	0,929	-
frequenzbezogene Parameter					
LF-Peak [Hz]	0,05 ± 0,021	0,05 ± 0,014	0,05 ± 0,018	0,710	-
HF-Peak [Hz]	0,19 ± 0,061	0,18 ± 0,052	0,16 ± 0,034	0,125	-
LF [%]	44,1 ± 19,28	43,9 ± 18,31	49,9 ± 16,16	0,228	-
HF [%]	16,3 ± 11,47	17,0 ± 13,10	13,7 ± 10,59	0,131	-
LF nu	73,0 ± 17,53	74,0 ± 16,84	81,7 ± 12,64	0,017	I – III (0,033) II – III (0,059 ^t)
HF nu	27,0 ± 17,53	26,0 ± 16,84	18,3 ± 12,64	0,017	I – III (0,033) II – III (0,059 ^t)
LF/HF	4,7 ± 3,57	5,6 ± 6,75	6,9 ± 5,30	0,013	I – III (0,033) II – III (0,033)
nicht-lineare Parameter					
SD1 [ms]	20,5 ± 12,33	20,9 ± 11,99	22,3 ± 13,50	0,261	-
SD2 [ms]	74,7 ± 33,39	73,5 ± 24,31	84,0 ± 26,83	0,006	I – III (0,007) II – III (0,071 ^t)
DFA1	1,38 ± 0,288	1,39 ± 0,300	1,49 ± 0,221	0,021	I – III (0,022)
DFA2	0,85 ± 0,223	0,82 ± 0,213	0,84 ± 0,203	0,961	-

Die Ruhephase und die simulierten Assistenzsysteme (vgl. Tabelle 48) zeigen in den zeitbezogenen Parametern signifikante Unterschiede bei Mean NN [ms], SDNN [ms] Mean HR [1/min] und SD HR [1/min] auf. Bei Mean NN [ms] ist der Wert der Ruhephase signifikant geringer als in dem AR-Durchlauf. SDNN [ms] und SD HR [1/min] sind in der Ruhephase signifikant höher als in den Arbeitsphasen. Bei Mean HR [1/min] ist der Wert der Ruhephase signifikant höher verglichen mit dem AR-Durchlauf. Der frequenzbezogene Parameter HF [%] ist signifikant unterschiedlich. HF [%] ist in der Ruhephase signifikant geringer verglichen mit den Arbeitsphasen. Der nicht-lineare Parameter SD2 [ms] ist in der Ruhephase deutlich größer als in den Arbeitsphasen.

Tabelle 48: HRV-Parameter bei der Ruhephase, den AR-Konturen und dem Pick-to-Light

HRV-Parameter	Ruhephase (I)	AR (II)	PtL (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD				
zeitbezogene Parameter					
Mean NN [ms]	724,7 ± 124,47	750,8 ± 126,46	750,4 ± 120,01	0,032	I – II (0,048)
SDNN [ms]	61,8 ± 20,54	50,6 ± 16,84	50,0 ± 16,39	< 0,001	I – II (< 0,001) I – III (0,013)
Mean HR [1/min]	85,5 ± 13,51	82,4 ± 13,75	82,4 ± 13,21	0,028	I – II (0,031)
SD HR [1/min]	7,0 ± 1,88	5,4 ± 1,47	5,4 ± 1,56	< 0,001	I – II (0,001) I – III (0,004)
RMSSD [ms]	31,6 ± 19,07	31,0 ± 17,38	31,1 ± 16,45	0,956	-
NN 50 [count]	43,5 ± 50,71	42,3 ± 46,13	44,9 ± 48,31	0,530	-
pNN 50 [%]	11,6 ± 15,77	11,6 ± 14,61	12,0 ± 14,25	0,530	-
frequenzbezogene Parameter					
LF-Peak [Hz]	0,05 ± 0,018	0,06 ± 0,021	0,05 ± 0,023	0,233	-
HF-Peak [Hz]	0,16 ± 0,034	0,20 ± 0,084	0,20 ± 0,083	0,031	-
LF [%]	49,9 ± 16,16	41,3 ± 14,66	38,6 ± 16,34	0,385	-
HF [%]	13,7 ± 10,59	47,2 ± 14,74	47,7 ± 15,95	< 0,001	I – II (< 0,001) I – III (< 0,001)
LF nu	81,7 ± 12,64	79,6 ± 10,89	77,1 ± 12,59	0,249	-
HF nu	18,3 ± 12,64	20,4 ± 10,89	22,9 ± 12,59	0,249	-
LF/HF	6,9 ± 5,30	5,8 ± 4,13	5,0 ± 3,43	0,321	-
nicht-lineare Parameter					
SD1 [ms]	22,3 ± 13,50	21,9 ± 12,81	21,9 ± 11,52	0,834	-
SD2 [ms]	84,0 ± 26,83	67,7 ± 21,90	66,8 ± 21,40	< 0,001	I – II (< 0,001) I – III (0,016)
DFA1	1,49 ± 0,221	1,38 ± 0,242	1,37 ± 0,247	0,041	-
DFA2	0,84 ± 0,203	0,87 ± 0,209	0,85 ± 0,192	0,422	-

Im Vergleich der Ruhephase, des ersten und zweiten Durchlaufs zeigt sich ein uneinheitliches Bild (vgl. Tabelle 49). Mean NN [ms] ist im zweiten Durchlauf signifikant größer als in der Ruhephase bzw. dem ersten Durchlauf. Umgekehrt ist Mean HR [1/min] im zweiten Durchlauf signifikant kleiner als in der Ruhephase bzw. dem ersten Durchlauf. SDNN [ms], SD HR [1/min] und SD2 [ms] sind in der Ruhephase signifikant größer, verglichen mit den Arbeitsphasen. HF [%] ist in der Ruhephase signifikant geringer, verglichen mit den Arbeitsdurchgängen. DFA1 ist signifikant größer in der Ruhephase, verglichen mit dem zweiten Durchlauf.

Tabelle 49: HRV-Parameter bei der Ruhephase und dem ersten und zweiten Durchlauf

HRV-Parameter	Ruhephase (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD				
zeitbezogene Parameter					
Mean NN [ms]	724,7 ± 124,47	741,7 ± 119,68	759,5 ± 126,13	< 0,001	I – III (< 0,001) II – III (0,003)
SDNN [ms]	61,8 ± 20,54	50,2 ± 15,89	50,4 ± 17,31	< 0,001	I – II (0,002) I – III (0,003)
Mean HR [1/min]	85,5 ± 13,51	83,3 ± 13,35	81,6 ± 13,56	0,001	I – III (0,001) II – III (0,020)
SD HR [1/min]	7,0 ± 1,88	5,5 ± 1,52	5,3 ± 1,51	< 0,001	I – II (0,006) I – III (0,001)
RMSSD [ms]	31,6 ± 19,07	30,8 ± 16,09	31,3 ± 17,72	1,000	-
NN 50 [count]	43,5 ± 50,71	42,1 ± 44,00	45,1 ± 50,25	0,530	-
pNN 50 [%]	11,6 ± 15,77	11,2 ± 13,21	12,4 ± 15,54	0,530	-
frequenzbezogene Parameter					
LF-Peak [Hz]	0,05 ± 0,018	0,06 ± 0,025	0,05 ± 0,017	0,056 ^t	-
HF-Peak [Hz]	0,16 ± 0,034	0,19 ± 0,082	0,20 ± 0,085	0,030	-
LF [%]	49,9 ± 16,16	37,6 ± 17,24	42,3 ± 13,29	0,170	-
HF [%]	13,7 ± 10,59	50,0 ± 16,81	44,9 ± 13,25	< 0,001	I – II (< 0,001) I – III (0,003)
LF nu	81,7 ± 12,64	79,4 ± 11,15	77,3 ± 12,40	0,125	-
HF nu	18,3 ± 12,64	20,6 ± 11,15	22,7 ± 12,40	0,125	-
LF/HF	6,9 ± 5,30	5,7 ± 4,09	5,0 ± 3,48	0,170	-
nicht-lineare Parameter					
SD1 [ms]	22,3 ± 13,50	21,7 ± 11,25	22,1 ± 12,43	0,873	-
SD2 [ms]	84,0 ± 26,83	67,1 ± 20,90	67,3 ± 22,38	0,001	I – II (0,003) I – III (0,004)
DFA1	1,49 ± 0,221	1,38 ± 0,257	1,37 ± 0,231	0,035	I – III (0,039)
DFA2	0,84 ± 0,203	0,86 ± 0,233	0,86 ± 0,162	0,727	-

Tabelle 50 zeigt die prozentuale Veränderung der HRV-Parameter im Vergleich der Ruhephase zu den AR-Konturen bzw. der Ruhephase zu Pick-to-Light, um die Auslenkungen der Beanspruchungsreaktionen zu verdeutlichen. Die Auslenkung bei HF nu ist signifikant größer bei Pick-to-Light verglichen mit den AR-Konturen.

Tabelle 50: Prozentuale Veränderung der HRV-Parameter für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System²⁷

HRV-Parameter	Ruhephase/AR	Ruhephase/PtL	pWilcoxon
	MW ± SD in [%]		
zeitbezogene Parameter			
Δ Mean NN [ms]	2,5 ± 4,33	2,6 ± 4,82	0,733
Δ SDNN [ms]	-16,9 ± 20,26	-18,2 ± 20,31	0,884
Δ Mean HR [1/min]	-2,5 ± 4,31	-2,4 ± 4,76	0,935
Δ SD HR [1/min]	-20,6 ± 18,14	-21,3 ± 20,60	0,715
Δ RMSSD [ms]	0,1 ± 28,21	-0,2 ± 21,31	0,770

²⁷ Für NN 50 und pNN 50 gilt n = 21, weil Proband 19 in der Ruhephase den Wert 0 hatte und in der prozentualen Berechnung nicht durch 0 geteilt werden kann.

HRV-Parameter	Ruhephase/AR	Ruhephase/PtL	pWilcoxon
	MW ± SD in [%]		
Δ NN 50 [count]	11,1 ± 70,07	5,8 ± 58,37	0,936
Δ pNN 50 [%]	14,9 ± 74,22	8,4 ± 60,89	0,809
frequenzbezogene Parameter			
Δ LF-Peak [Hz]	10,8 ± 29,70	13,3 ± 52,38	0,695
Δ HF-Peak [Hz]	25,7 ± 52,65	25,5 ± 50,75	0,917
Δ LF [%]	-3,8 ± 61,87	-10,8 ± 55,20	0,390
Δ HF [%]	512,5 ± 548,57	490,6 ± 441,30	0,685
Δ LF nu	-2,1 ± 14,89	-4,8 ± 19,70	0,140
Δ HF nu	24,9 ± 46,95	47,5 ± 73,58	0,026
Δ LF/HF	-5,7 ± 50,61	-11,4 ± 62,31	0,178
nicht-lineare Parameter			
Δ SD1 [ms]	-0,2 ± 28,05	-0,5 ± 21,26	0,733
Δ SD2 [ms]	-18,1 ± 20,64	-19,3 ± 20,87	0,858
Δ DFA1	-6,9 ± 12,48	-7,8 ± 13,40	0,709
Δ DFA2	5,5 ± 25,56	4,0 ± 23,89	0,758

Im Vergleich der beiden Trainingsgruppen (Trainingsfilm bzw. Desktoptraining) werden signifikante Unterschiede bei LF-Peak [Hz], LF [%], HF [%] sowie DFA1 deutlich (vgl. Tabelle 51).

Tabelle 51: HRV-Parameter bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe

HRV-Parameter	Trainingsfilm	Desktoptraining	pMann-Whitney-U
	MW ± SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	724,3 ± 113,75	776,9 ± 126,51	0,656
SDNN [ms]	47,5 ± 16,41	53,0 ± 16,34	0,366
Mean HR [1/min]	85,6 ± 15,00	79,3 ± 10,85	0,606
SD HR [1/min]	5,4 ± 1,75	5,3 ± 1,25	0,606
RMSSD [ms]	27,2 ± 13,89	35,0 ± 18,66	0,241
NN 50 [count]	36,6 ± 40,26	50,6 ± 52,37	0,270
pNN 50 [%]	9,3 ± 10,75	14,3 ± 16,97	0,245
frequenzbezogene Parameter			
LF-Peak [Hz]	0,05 ± 0,011	0,06 ± 0,027	0,047
HF-Peak [Hz]	0,19 ± 0,080	0,20 ± 0,086	0,898
LF [%]	45,7 ± 15,56	34,2 ± 13,17	0,014
HF [%]	42,7 ± 15,15	52,2 ± 13,96	0,031
LF nu	78,0 ± 12,53	78,7 ± 11,10	0,869
HF nu	22,0 ± 12,53	21,3 ± 11,10	0,869
LF/HF	5,6 ± 4,36	5,1 ± 3,16	0,869
nicht-lineare Parameter			
SD1 [ms]	19,2 ± 9,84	24,6 ± 13,02	0,241
SD2 [ms]	64,2 ± 21,63	70,3 ± 21,20	0,418
DFA1	1,40 ± 0,246	1,35 ± 0,241	0,581
DFA2	0,93 ± 0,192	0,79 ± 0,186	0,026

Tabelle 52 zeigt, dass sich der Durchlauf signifikant auf die prozentuale Veränderung von Mean NN [ms], Mean HR [1/min] und LF-Peak [Hz] auswirkt. Der Durchlauf wirkt sich zudem tendenziell auf SD HR [1/min] und LF [%] aus. Die Sequenz wirkt sich tendenziell auf HF [%] aus. Zudem wirkt sich die Simulation auf HF [nu] aus.

Tabelle 52: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die HRV-Daten mittels LGM

	Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
p_{LGM}				
zeitbezogene Parameter				
Δ Mean NN [ms]	0,390	< 0,001	0,136	0,309
Δ SDNN [ms]	0,700	0,694	0,817	0,846
Δ Mean HR [1/min]	0,295	< 0,001	0,189	0,301
Δ SD HR [1/min]	0,966	0,097 ^t	0,486	0,702
Δ RMSSD [ms]	0,952	0,735	0,918	0,906
Δ NN 50 [count]	0,590	0,381	0,828	0,869
Δ pNN 50 [count]	0,494	0,519	0,945	0,901
frequenzbezogene Parameter				
Δ LF-Peak [Hz]	0,510	0,023	0,222	0,338
Δ HF-Peak [Hz]	0,821	0,291	0,343	0,688
Δ LF [%]	0,173	0,092 ^t	0,520	0,359
Δ HF [%]	0,826	0,147	0,060 ^t	0,501
Δ LF nu	0,167	0,177	0,547	0,417
Δ HF nu	0,027	0,103	0,605	0,931
Δ LF/HF	0,448	0,210	0,319	0,787
nicht-lineare Parameter				
Δ SD1 [ms]	0,970	0,742	0,967	0,860
Δ SD2 [ms]	0,726	0,728	0,772	0,798
Δ DFA1	0,708	0,821	0,920	0,917
Δ DFA2	0,731	0,813	0,670	0,903

3.2.3 Subjektive Beanspruchungsdaten

Im Folgenden werden die Ergebnisse des VFQ, der EZ-Skala und der RSME beschrieben.

VFQ

Zwischen der Messung vorher (I), nach dem Durchlauf mit den AR-Konturen (II) und nach dem Durchlauf mit der Pick-to-Light-Modalität (III) zeigen sich mit dem Friedman-Test und anschließend dem Post-Hoc-Test keine signifikanten Unterschiede in den visuellen Beschwerden (vgl. Tabelle 53).

Tabelle 53: VFQ-Beschwerden vorher, bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light

Beschwerde [Punkte]	vorher (I)	AR (II)	PtL (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW \pm SD MD (Min – Max)				
Trockene Augen	2,5 \pm 2,22 2 (1 – 8)	1,8 \pm 0,83 2 (1 – 4)	1,8 \pm 1,00 2 (1 – 4)	0,649	-
Tränende Augen	1,7 \pm 1,28 1 (1 – 6)	1,3 \pm 0,63 1 (1 – 3)	1,5 \pm 0,82 1 (1 – 4)	0,018	-
Die Augen sind gereizt oder brennen	2,3 \pm 1,67 2 (1 – 8)	1,5 \pm 0,71 1 (1 – 3)	1,5 \pm 0,65 1 (1 – 3)	0,005	-
Schmerzen in oder um die Augen	1,3 \pm 0,63 1 (1 – 3)	1,2 \pm 0,60 1 (1 – 3)	1,1 \pm 0,33 1 (1 – 2)	0,115	-
Schwere Augen	2,2 \pm 1,53 2 (1 – 6)	1,8 \pm 1,03 2 (1 – 5)	1,9 \pm 1,2 1 (1 – 4)	0,360	-
Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können	1,2 \pm 0,37 1 (1 – 2)	1,2 \pm 0,66 1 (1 – 4)	1,1 \pm 0,28 1 (1 – 2)	0,174	-
Schwierigkeiten scharf zu sehen	1,7 \pm 1,31 1 (1 – 7)	1,5 \pm 1,19 1 (1 – 6)	1,3 \pm 0,85 1 (1 – 5)	0,107	-
Springender Text	1,1 \pm 0,33 1 (1 – 2)	1,1 \pm 0,28 1 (1 – 2)	1,1 \pm 0,33 1 (1 – 2)	0,368	-
Verschwommene Buchstaben	1,2 \pm 0,52 1 (1 – 3)	1,4 \pm 1,08 1 (1 – 6)	1,2 \pm 0,72 1 (1 – 4)	0,790	-
Blendung durch Lichter	1,8 \pm 1,39 1 (1 – 6)	1,3 \pm 1,03 1 (1 – 6)	1,3 \pm 1,02 1 (1 – 6)	0,018	-
Verschwommene Sicht	1,2 \pm 0,37 1 (1 – 2)	1,4 \pm 0,91 1 (1 – 5)	1,2 \pm 0,37 1 (1 – 2)	0,449	-
Doppelsehen	1,1 \pm 0,33 1 (1 – 2)	1,1 \pm 0,44 1 (1 – 3)	1,1 \pm 0,23 1 (1 – 2)	0,607	-
Kopfschmerzen	1,3 \pm 0,61 1 (1 – 3)	1,5 \pm 0,96 1 (1 – 4)	1,4 \pm 0,87 1 (1 – 4)	0,438	-
Nackenschmerzen	1,8 \pm 1,08 1 (1 – 4)	2,0 \pm 1,54 1 (1 – 7)	2,0 \pm 1,54 1 (1 – 7)	0,368	-
Übelkeit	1,0 \pm 0,20 1 (1 – 2)	1,2 \pm 0,65 1 (1 – 4)	1,2 \pm 0,72 1 (1 – 4)	0,368	-
Geistige Ermüdung	1,7 \pm 0,68 2 (1 – 3)	1,8 \pm 0,93 1 (1 – 4)	1,8 \pm 1,00 2 (1 – 4)	0,598	-

Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in Tabelle 54 wider. Hier zeigen sich im Post-Hoc-Test keine signifikanten Veränderungen im zeitlichen Verlauf.

Tabelle 54: VFQ-Beschwerden vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf

Beschwerde [Punkte]	vorher (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD MD (Min – Max)				
Trockene Augen	2,5 ± 2,22 2 (1 – 8)	1,8 ± 0,87 2 (1 – 4)	1,8 ± 0,87 2 (1 – 4)	0,704	-
Tränende Augen	1,7 ± 1,28 1 (1 – 6)	1,5 ± 0,82 1 (1 – 4)	1,3 ± 0,63 1 (1 – 3)	0,018	-
Die Augen sind gereizt oder brennen	2,3 ± 1,67 2 (1 – 8)	1,6 ± 0,71 1 (1 – 3)	1,4 ± 0,65 1 (1 – 3)	0,003	-
Schmerzen in oder um die Augen	1,3 ± 0,63 1 (1 – 3)	1,2 ± 0,60 1 (1 – 3)	1,1 ± 0,33 1 (1 – 2)	0,115	-
Schwere Augen	2,2 ± 1,53 2 (1 – 6)	1,9 ± 1,12 2 (1 – 4)	1,8 ± 1,07 1 (1 – 5)	0,408	-
Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können	1,2 ± 0,37 1 (1 – 2)	1,2 ± 0,66 1 (1 – 4)	1,1 ± 0,28 1 (1 – 2)	0,174	-
Schwierigkeiten scharf zu sehen	1,7 ± 1,31 1 (1 – 7)	1,5 ± 1,19 1 (1 – 6)	1,3 ± 0,85 1 (1 – 5)	0,072 ^t	-
Springender Text	1,1 ± 0,33 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,33 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,28 1 (1 – 2)	0,368	-
Verschwommene Buchstaben	1,2 ± 0,52 1 (1 – 3)	1,4 ± 1,08 1 (1 – 6)	1,2 ± 0,72 1 (1 – 4)	0,790	-
Blendung durch Lichter	1,8 ± 1,39 1 (1 – 6)	1,4 ± 1,04 1 (1 – 6)	1,2 ± 1,01 1 (1 – 6)	0,011	-
Verschwommene Sicht	1,2 ± 0,37 1 (1 – 2)	1,4 ± 0,91 1 (1 – 5)	1,2 ± 0,37 1 (1 – 2)	0,449	-
Doppelsehen	1,1 ± 0,33 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,28 1 (1 – 2)	1,1 ± 0,44 1 (1 – 3)	0,607	-
Kopfschmerzen	1,3 ± 0,61 1 (1 – 3)	1,3 ± 0,79 1 (1 – 4)	1,6 ± 1,00 1 (1 – 4)	0,019	-
Nackenschmerzen	1,8 ± 1,08 1 (1 – 4)	2,0 ± 1,54 1 (1 – 7)	2,0 ± 1,54 1 (1 – 7)	0,368	-
Übelkeit	1,0 ± 0,20 1 (1 – 2)	1,2 ± 0,62 1 (1 – 4)	1,3 ± 0,74 1 (1 – 4)	0,116	-
Geistige Ermüdung	1,7 ± 0,68 2 (1 – 3)	1,8 ± 0,85 2 (1 – 3)	1,8 ± 0,97 1 (1 – 4)	0,598	-

Auch im prozentualen Differenzvergleich der visuellen Beschwerden der Ruhephase zu den AR-Konturen bzw. der Ruhephase zum Pick-to-Light-System können anhand des Wilcoxon-Tests keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (vgl. Tabelle 55).

Ein Vergleich der Trainingsgruppen (Trainingsfilm bzw. Desktoptraining) wurde hinsichtlich der visuellen Beschwerden mittels Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, ergab jedoch keine statistisch bedeutsamen Unterschiede. Auf eine tabellarische Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle 55: Prozentuale Veränderung der VFQ-Beschwerden für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System

Beschwerde	vorher/AR	vorher/PtL	pWilcoxon
	MW ± SD in [%]		
Δ Trockene Augen	4,0 ± 63,74	6,1 ± 62,01	0,674
Δ Tränende Augen	-12,4 ± 22,60	1,6 ± 65,86	0,180
Δ Die Augen sind gereizt oder brennen	-18,57 ± 37,92	-16,2 ± 40,51	0,684
Δ Schmerzen in oder um die Augen	-0,7 ± 30,23	-8,0 ± 19,32	0,109
Δ Schwere Augen	9,9 ± 91,51	11,3 ± 76,82	0,623
Δ Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können	6,0 ± 30,00	-4,0 ± 13,84	0,102
Δ Schwierigkeiten scharf zu sehen	-0,1 ± 50,63	-8,1 ± 42,43	0,131
Δ Springender Text*	-2,0 ± 10,00	0,0 ± 0,00	0,317
Δ Verschwommene Buchstaben	6,7 ± 43,30	1,3 ± 18,43	0,357
Δ Blendung durch Lichter	-10,5 ± 35,36	-14,2 ± 27,03	0,593
Δ Verschwommene Sicht	20,0 ± 82,92	2,0 ± 22,73	0,357
Δ Doppelsehen	0,0 ± 14,43	-2,0 ± 10,00	0,317
Δ Kopfschmerzen	24,0 ± 70,89	5,3 ± 15,00	0,268
Δ Nacken-schmerzen	13,7 ± 49,35	11,0 ± 34,75	0,655
Δ Übelkeit	18,0 ± 65,95	20,0 ± 70,71	0,785
Δ Geistige Ermüdung	9,3 ± 66,85	12,0 ± 51,49	0,553

*: aufgrund konstanter Werte sind die Ergebnisse bedingt aussagekräftig

Mithilfe des LGM zeigt sich ein signifikanter Einfluss des Durchlaufs auf die prozentuale Veränderung der Beschwerde „Kopfschmerzen“ (vgl. Tabelle 56).

Tabelle 56: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die VFQ-Beschwerden mittels LGM

	Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
	pLGM			
Δ Trockene Augen	0,213	0,655	0,150	0,685
Δ Tränende Augen	0,108	0,108	0,174	0,093
Δ Die Augen sind gereizt oder brennen	0,956	0,121	0,469	0,755
Δ Schmerzen in oder um die Augen	0,117	0,117	0,572	0,848
Δ Schwere Augen	0,657	0,262	0,894	0,287
Δ Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können	0,136	0,136	0,438	0,105
Δ Schwierigkeiten scharf zu sehen	0,280	0,553	0,465	0,218
Δ Springender Text	0,268	0,268	0,320	0,368
Δ Verschwommene Buchstaben	0,360	0,360	0,512	0,916
Δ Blendung durch Lichter	0,837	0,135	0,121	0,375
Δ Verschwommene Sicht	0,380	0,380	0,476	0,603
Δ Doppelsehen	0,268	0,268	0,348	0,516
Δ Kopfschmerzen	0,953	0,026	0,164	0,799
Δ Nackenschmerzen	0,591	0,591	0,833	0,553
Δ Übelkeit	0,679	0,168	0,557	0,135
Δ Geistige Ermüdung	0,208	0,183	0,853	0,662

EZ-Skala

Vergleicht man die Daten zwischen der EZ-Skala vorher (I), nach dem Durchlauf mit den AR-Konturen (II) und nach dem Pick-to-Light-System (III) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede mit dem Friedman-Test (vgl. Tabelle 57).

Tabelle 57: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System

Binärfaktor [Stanine]	vorher (I)	AR (II)	PtL (III)	p _{Friedman}	p _{Bonferroni}
	MW ± SD MD (Min – Max)				
EZ100 (MOT)	5,5 ± 1,64 5 (3 – 9)	5,2 ± 1,78 5 (2 – 9)	5,2 ± 1,88 5 (1 – 9)	0,796	-
EZ200 (BEA)	5,9 ± 1,39 6 (3 – 9)	6,0 ± 1,38 6 (4 – 9)	5,8 ± 1,45 5 (3 – 9)	0,380	-
EZ110 (AKT)	5,5 ± 1,50 6 (3 – 8)	5,0 ± 1,61 5 (2 – 8)	5,2 ± 1,77 6 (1 – 8)	0,057 ^t	-
EZ120 (EFF)	5,2 ± 1,83 5 (2 – 9)	5,2 ± 1,94 5 (2 – 9)	5,3 ± 1,79 5 (2 – 9)	0,886	-
EZ210 (TEN)	5,4 ± 1,19 5 (3 – 7)	5,4 ± 1,35 5 (3 – 8)	5,2 ± 1,48 5 (2 – 8)	0,586	-
EZ220 (DEF)	6,3 ± 1,38 6 (4 – 9)	6,4 ± 1,23 6 (4 – 9)	6,3 ± 1,31 6 (4 – 9)	0,461	-
EZ111 (ANBE)	5,9 ± 1,26 6 (4 – 8)	5,4 ± 1,50 5 (3 – 8)	5,7 ± 1,72 6 (2 – 9)	0,140	-
EZ112 (KON)	4,5 ± 1,74 5 (1 – 9)	4,0 ± 1,54 4 (1 – 8)	4,0 ± 1,19 6 (4 – 9)	0,133	-
EZ121 (SOZ)	5,3 ± 1,80 5 (2 – 9)	5,0 ± 1,86 5 (2 – 9)	5,0 ± 1,74 5 (2 – 9)	0,208	-
EZ122 (SICH)	5,0 ± 1,71 5 (2 – 9)	5,4 ± 1,89 5 (2 – 9)	5,4 ± 1,71 5 (2 – 9)	0,205	-
EZ211 (STIM)	5,4 ± 1,36 5 (3 – 8)	5,4 ± 1,29 6 (3 – 7)	5,3 ± 1,25 5 (2 – 7)	0,728	-
EZ212 (SPAN)	5,2 ± 1,17 5 (2 – 7)	5,2 ± 1,35 5 (3 – 8)	5,2 ± 1,57 5 (3 – 9)	0,692	-
EZ221 (ERH)	6,2 ± 1,33 6 (4 – 9)	6,5 ± 1,16 6 (5 – 9)	6,2 ± 1,19 6 (4 – 9)	0,204	-
EZ222 (SCHL)	6,4 ± 1,73 6 (3 – 9)	6,2 ± 1,62 3 (3 – 9)	6,4 ± 1,98 6 (3 – 9)	0,698	-

Im zeitlichen Verlauf – unabhängig vom simulierten Assistenzsystem – zeigt sich im Friedman-Test, jedoch nicht nach dem Post-Hoc-Test, eine höhere Selbstsicherheit mit fortschreitender Zeit. Die Aktivierung ist tendenziell unterschiedlich (vgl. Tabelle 58).

Tabelle 58: Binärfaktoren der EZ-Skala vorher, bei dem ersten und zweiten Durchlauf

Binärfaktor [Stanine]	vorher (I)	1. Durchlauf (II)	2. Durchlauf (III)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD MD (Min – Max)				
EZ100 (MOT)	5,5 ± 1,64 5 (3 – 9)	5,2 ± 1,72 5 (2 – 9)	5,3 ± 1,93 5 (1 – 9)	0,796	-
EZ200 (BEA)	5,9 ± 1,39 6 (3 – 9)	6,0 ± 1,32 6 (4 – 9)	5,8 ± 1,51 5 (3 – 9)	0,380	-
EZ110 (AKT)	5,5 ± 1,50 6 (3 – 8)	5,2 ± 1,63 5 (2 – 8)	5,0 ± 1,74 5 (1 – 8)	0,057 ^t	-
EZ120 (EFF)	5,2 ± 1,83 5 (2 – 9)	5,1 ± 1,82 5 (2 – 9)	5,4 ± 1,89 5 (2 – 9)	0,476	-
EZ210 (TEN)	5,4 ± 1,19 5 (3 – 7)	5,4 ± 1,35 5 (3 – 8)	5,2 ± 1,48 5 (2 – 8)	0,696	-
EZ220 (DEF)	6,3 ± 1,38 6 (4 – 9)	6,5 ± 1,23 7 (4 – 9)	6,2 ± 1,30 6 (4 – 9)	0,209	-
EZ111 (ANBE)	5,9 ± 1,26 6 (4 – 8)	5,7 ± 1,68 5 (3 – 9)	5,4 ± 1,56 5 (2 – 8)	0,264	-
EZ112 (KON)	4,5 ± 1,74 5 (1 – 9)	4,0 ± 1,34 4 (1 – 6)	4,1 ± 1,68 4 (1 – 8)	0,199	-
EZ121 (SOZ)	5,3 ± 1,80 5 (2 – 9)	5,0 ± 1,74 5 (2 – 9)	5,0 ± 1,86 5 (2 – 9)	0,201	-
EZ122 (SICH)	5,0 ± 1,71 5 (2 – 9)	5,2 ± 1,77 5 (2 – 9)	5,6 ± 1,80 5 (2 – 9)	0,041	-
EZ211 (STIM)	5,4 ± 1,36 5 (3 – 8)	5,4 ± 1,16 5 (3 – 7)	5,4 ± 1,38 5 (2 – 7)	0,976	-
EZ212 (SPAN)	5,2 ± 1,17 5 (2 – 7)	5,2 ± 1,62 5 (3 – 9)	5,1 ± 1,29 5 (3 – 8)	0,396	-
EZ221 (ERH)	6,2 ± 1,33 6 (4 – 9)	6,4 ± 1,19 6 (4 – 8)	6,4 ± 1,19 6 (5 – 9)	0,662	-
EZ222 (SCHL)	6,4 ± 1,73 6 (3 – 9)	6,4 ± 1,81 6 (3 – 9)	6,2 ± 1,81 6 (3 – 9)	0,841	-

Tabelle 59 zeigt die prozentuale Veränderung der Binärfaktoren der EZ-Skala vor dem Versuch mit den beiden Varianten (AR-Konturen und Pick-to-Light). Signifikante Unterschiede sind nicht zu erkennen.

Tabelle 59: Prozentuale Veränderung der Binärfaktoren der EZ-Skala für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System

Binärfaktor	vorher/AR	vorher/PtL	pWilcoxon
	MW ± SD in [%]		
Δ EZ100 (MOT)	-4,4 ± 18,55	-2,0 ± 27,47	0,593
Δ EZ200 (BEA)	5,0 ± 24,54	1,8 ± 29,24	0,288
Δ EZ110 (AKT)	-8,3 ± 25,18	-4,1 ± 33,63	0,694
Δ EZ120 (EFF)	1,1 ± 19,57	6,5 ± 37,13	0,476
Δ EZ210 (TEN)	2,7 ± 24,01	-0,3 ± 25,70	0,210
Δ EZ220 (DEF)	4,8 ± 22,86	2,9 ± 25,85	0,371

Binärfaktor	vorher/AR	vorher/PtL	p _{Wilcoxon}
	MW ± SD in [%]		
Δ EZ111 (ANBE)	-8,0 ± 20,59	-1,9 ± 27,99	0,141
Δ EZ112 (KON)	-3,5 ± 37,15	1,7 ± 55,88	0,504
Δ EZ121 (SOZ)	-5,5 ± 19,81	-2,0 ± 32,76	0,721
Δ EZ122 (SICH)	12,5 ± 38,58	14,6 ± 39,12	0,699
Δ EZ211 (STIM)	3,6 ± 30,93	1,6 ± 30,40	0,523
Δ EZ212 (SPAN)	3,0 ± 30,90	2,3 ± 37,77	0,437
Δ EZ221 (ERH)	7,6 ± 23,00	3,5 ± 29,06	0,208
Δ EZ222 (SCHL)	2,2 ± 28,59	6,0 ± 33,15	0,424

Im Vergleich der Gruppe, die den Trainingsfilm sah und der Gruppe, die das Desktoptraining absolvierte, bewertet die Desktoptraining-Gruppe ihre Selbstsicherheit signifikant höher. Auch die Kontaktbereitschaft ist bei dieser Gruppe tendenziell höher (vgl. Tabelle 60).

Tabelle 60: Binärfaktoren der EZ-Skala bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe

Binärfaktor [Stanine]	Trainings- film	Desktop- training	p _{Mann-Whitney-U}
	MW ± SD MD (Min – Max)		
EZ100 (MOT)	5,0 ± 2,14 5 (1 – 9)	5,5 ± 1,35 5 (3 – 8)	0,162
EZ200 (BEA)	5,9 ± 1,63 6 (3 – 9)	5,9 ± 1,15 6 (4 – 8)	0,905
EZ110 (AKT)	4,9 ± 1,84 4,5 (1 – 8)	5,3 ± 1,49 6 (2 – 7)	0,416
EZ120 (EFF)	5,0 ± 2,13 5 (2 – 9)	5,5 ± 1,50 5 (3 – 9)	0,282
EZ210 (TEN)	5,3 ± 1,59 5 (2 – 8)	5,4 ± 1,21 5 (3 – 8)	0,566
EZ220 (DEF)	6,5 ± 1,36 6,5 (4 – 9)	6,3 ± 1,15 6 (4 – 9)	0,533
EZ111 (ANBE)	5,5 ± 1,75 5 (2 – 8)	5,7 ± 1,47 6 (3 – 9)	0,635
EZ112 (KON)	3,6 ± 1,50 3,5 (1 – 7)	4,5 ± 1,41 4,5 (2 – 8)	0,052 [†]
EZ121 (SOZ)	5,0 ± 1,89 4,5 (2 – 8)	5,0 ± 1,71 5 (2 – 9)	0,929
EZ122 (SICH)	5,0 ± 2,13 5 (2 – 9)	5,9 ± 1,19 5,5 (4 – 8)	0,017
EZ211 (STIM)	5,3 ± 1,46 5 (2 – 7)	5,5 ± 1,02 5 (3 – 7)	0,904
EZ212 (SPAN)	5,0 ± 1,48 5 (3 – 9)	5,4 ± 1,41 5 (3 – 8)	0,236
EZ221 (ERH)	6,5 ± 1,21 7 (5 – 9)	6,2 ± 1,14 6 (4 – 9)	0,349
EZ222 (SCHL)	6,4 ± 1,83 6 (3 – 9)	6,3 ± 1,79 6 (3 – 9)	0,850

Tabelle 61 zeigt die Berechnungen mithilfe des LGM. Ein signifikanter Einfluss des Durchlaufs auf die prozentuale Veränderung der Selbstsicherheit (SICH) und des Trainings auf die Kontaktbereitschaft (KON) kann ermittelt werden. Die Simulation wirkt sich tendenziell auf die Anstrengungsbereitschaft (ANBE) und der Durchlauf tendenziell auf die Effizienz (EFF) aus.

Tabelle 61: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die Motivations- und Beanspruchungslage mittels LGM

	Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
	p _{LGM}			
Δ EZ100 (MOT)	0,563	0,596	0,885	0,650
Δ EZ200 (BEA)	0,405	0,243	0,736	0,957
Δ EZ110 (AKT)	0,293	0,220	0,642	0,247
Δ EZ120 (EFF)	0,347	0,098 ^t	0,512	0,898
Δ EZ210 (TEN)	0,425	0,307	0,370	0,700
Δ EZ220 (DEF)	0,541	0,163	0,987	0,601
Δ EZ111 (ANBE)	0,087 ^t	0,168	0,245	0,635
Δ EZ112 (KON)	0,374	0,751	0,793	0,034
Δ EZ121 (SOZ)	0,532	0,831	0,319	0,589
Δ EZ122 (SICH)	0,759	0,008	0,701	0,516
Δ EZ211 (STIM)	0,576	0,659	0,393	0,522
Δ EZ212 (SPAN)	0,716	0,984	0,968	0,283
Δ EZ221 (ERH)	0,148	0,973	0,874	0,774
Δ EZ222 (SCHL)	0,391	0,606	0,849	0,855

RSME

Die Ergebnisse der RSME (vgl. Tabelle 62) zeigen einen signifikant höheren Wert nach dem Durchlauf mit den AR-Konturen im Vergleich zum Pick-to-Light-System ($47,8 \pm 37,11$ zu $37,9 \pm 22,6$ Punkte; $p_{\text{Wilcoxon}} = 0,004$). Auch mithilfe des LGM ist dieser Unterschied tendenziell sichtbar (vgl. Tabelle 64).

Ein statistisch relevanter Unterschied im Vergleich vom ersten zum zweiten Durchlauf ist nicht erkennbar (vgl. Tabelle 62).

Tabelle 62: RSME bei den Assistenzfunktionen und bei den Durchläufen

Bedingung	RSME [Punkte]	p _{Wilcoxon}
	MW ± SD MD (Min – Max)	
AR-Konturen	47,8 ± 37,11 40 (5 – 180)	0,004
Pick-to-Light	37,9 ± 22,64 30 (5 – 100)	
1. Durchlauf	45,5 ± 36,85 38 (5 – 180)	0,135
2. Durchlauf	40,2 ± 23,83 40 (5 – 100)	

Zwischen den Trainingsgruppen (vgl. Tabelle 63) ist kein bedeutsamer Unterschied durch die RSME erkennbar.

Tabelle 63: RSME bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe

Trainingsart	RSME [Punkte]	p _{Mann-Whitney-U}
	MW ± SD MD (Min – Max)	
Trainingsfilm	47,5 ± 38,87 30 (20 – 180)	0,875
Desktoptraining	37,8 ± 18,23 40 (5 – 80)	

Tabelle 64: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die subjektive Beanspruchung mittels LGM

	Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
	p _{LGM}			
RSME	0,058 ^t	0,271	0,208	0,507

3.2.4 Objektive Leistungsdaten

Da bei einem Probanden die Montage des letzten Wegeventils aufgrund einer technischen Störung nicht abgeschlossen werden konnte, wird dieser Datensatz für die Auswertung der objektiven Leistungsdaten ausgeschlossen. Damit gilt für alle Tabellen des Abschnitts 3.2.4 n = 24.

Unterschiede in der Montagedauer und der Fehlerzahl des Wegeventils vor dem Puzzle können rein deskriptiv festgestellt werden, wobei die Montage mithilfe der AR-Konturen höhere Maximalwert gegenüber dem Pick-to-Light-System zeigt. Signifikante Unterschiede können jedoch nicht ausgemacht werden (vgl. Tabelle 65).

Tabelle 65: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil vor dem Puzzle mit den AR-Konturen und mit dem Pick-to-Light-System

Variable	Wegeventil vor dem Puzzle		pWilcoxon
	AR	PtL	
	MW ± SD MD (Min – Max)		
Dauer [s]	185,3 ± 87,88 173 (81 – 473)	162,3 ± 64,27 144 (94 – 298)	0,407
Fehlerzahl	1,5 ± 3,24 0 (0 – 14)	0,5 ± 1,32 0 (0 – 5)	0,233

Wie bei dem Wegeventil vor dem Puzzle sind auch im Systemvariantenvergleich des Wegeventils nach dem Puzzle keine Unterschiede in Dauer und Fehlerzahl erkennbar (vgl. Tabelle 66).

Tabelle 66: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil nach dem Puzzle mit den AR-Konturen und mit dem Pick-to-Light-System

Variable	Wegeventil nach dem Puzzle		pWilcoxon
	AR	PtL	
	MW ± SD MD (Min – Max)		
Dauer [s]	117,7 ± 39,97 102 (69 – 208)	114,5 ± 35,98 102,5 (76 – 208)	0,587
Fehlerzahl	0,7 ± 1,55 0 (0 – 7)	0,4 ± 0,97 0 (0 – 4)	0,378

Unabhängig der verwendeten Assistenzsysteme zeigt sich im zeitlichen Verlauf eine signifikant verringerte benötigte Bearbeitungsdauer des Wegeventils. In der Fehlerzahl zeigen sich keine statistisch relevanten Unterschiede (vgl. Tabelle 67).

Tabelle 67: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil im zeitlichen Verlauf

Variable	Wegeventil 1 (I)	Wegeventil 2 (II)	Wegeventil 3 (III)	Wegeventil 4 (IV)	pFriedman	pBonferroni
	MW ± SD MD (Min – Max)					
	Dauer [s]	225,6 ± 75,53 201,5 (129 – 473)	128,8 ± 41,59 116,5 (85 – 208)	121,9 ± 28,60 112 (81 – 178)		
Fehlerzahl	1,6 ± 3,34 0 (0 – 14)	0,7 ± 1,63 0 (0 – 7)	0,4 ± 0,93 0 (0 – 4)	0,4 ± 0,83 0 (0 – 3)	0,908	-

In Tabelle 68 wird die Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil vor dem Puzzle hinsichtlich der Gruppe, die zu Beginn den Trainingsfilm geschaut hat, und der Gruppe, die das Desktoptraining absolviert hat, verglichen. Die Montagedauer ist bei der Trainingsfilm-Gruppe signifikant länger und die Fehlerzahl signifikant höher im Vergleich zur Desktoptraining-Gruppe.

Tabelle 68: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil vor dem Puzzle bei der Trainingsfilm-Gruppe und bei der Desktoptraining-Gruppe

Variable	Wegeventil vor dem Puzzle		p _{Mann-Whitney-U}
	Trainingsfilm	Desktoptraining	
	MW ± SD MD (Min – Max)		
Dauer [s]	193,8 ± 49,40 186,5 (131 – 307,5)	153,8 ± 30,84 151,3 (105 – 227)	0,024
Fehlerzahl	1,7 ± 2,12 1,25 (0 – 7)	0,3 ± 0,62 0 (0 – 2)	0,042

In Tabelle 69 wird die Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil nach dem Puzzle hinsichtlich der Gruppe, die den Trainingsfilm zu Beginn geschaut hat und der Gruppe, die das Desktoptraining absolviert hat, verglichen. Signifikante Unterschiede zeigen sich hier nicht.

Tabelle 69: Montagedauer und Fehlerzahl bei dem Wegeventil nach dem Puzzle bei der Trainingsfilm-Gruppe und bei der Desktoptraining-Gruppe

Variable	Wegeventil nach dem Puzzle		p _{Mann-Whitney-U}
	Trainingsfilm	Desktoptraining	
	MW ± SD MD (Min – Max)		
Dauer [s]	122,0 ± 28,67 117 (81,5 – 174,5)	110,2 ± 31,27 95,8 (80 – 173,5)	0,386
Fehlerzahl	0,3 ± 0,58 0 (0 – 2)	0,8 ± 1,59 0,25 (0 – 3,5)	0,409

Mithilfe des LGM (vgl. Tabelle 70) wird ermittelt, inwiefern die Assistenzfunktion (AR-Konturen; Pick-to-Light), der Durchlauf (1. Durchlauf; 2. Durchlauf), die Sequenz (erst AR, dann Pick-to-Light; erst Pick-to-Light, dann AR) und das Training (Desktoptraining, Trainingsfilm) Einfluss auf die objektiven Leistungsdaten haben. Es zeigen sich signifikante Einflüsse des Durchlaufs auf die Montagedauer (vor sowie nach dem Puzzle), ein signifikanter Einfluss des Trainings auf die Montagedauer vor dem Puzzle sowie ein tendenzieller Einfluss des Trainings auf die Fehlerzahl vor dem Puzzle.

Tabelle 70: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die objektiven Leistungsdaten mittels LGM

	Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
	p _{LGM}			
Montagedauer Wegeventil vor dem Puzzle (WV vP)	0,694	< 0,001	0,726	0,036
Montagedauer Wegeventil nach dem Puzzle (WV nP)	0,902	0,006	0,427	0,290
Fehler bei Wegeventil vor dem Puzzle	0,291	0,140	0,444	0,063 ^t
Fehler bei Wegeventil nach dem Puzzle	0,516	0,516	0,971	0,248

3.2.5 Usability-Daten

Im Folgenden werden die Ergebnisse zum favorisierten Assistenzsystem, zur SUS, zu den Teilskalen des TAM und zum ISONORM-Fragebogen dargestellt.

Favorit

Am Ende des Versuchs wurden die Probanden gefragt, mit welchem Assistenzsystem sie zukünftig lieber arbeiten wollen. 56 % der Probanden würden zukünftig vorzugsweise mit dem Pick-to-Light-System und 20 % mit den AR-Konturen arbeiten wollen. 24 % der Probanden kreuzten „ist mir egal / weiß nicht“ an (vgl. Abbildung 40).

Mit welchem Assistenzsystem würden Sie zukünftig lieber arbeiten wollen?

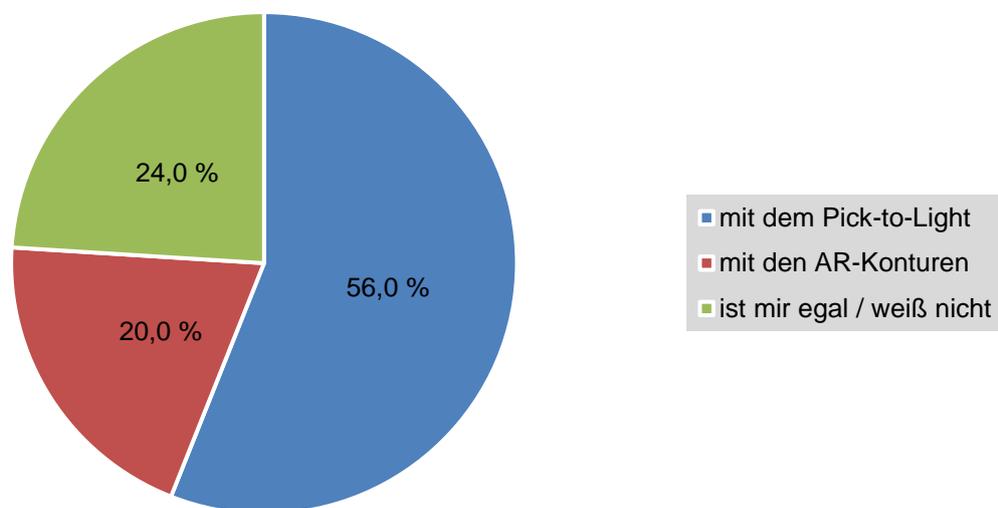


Abbildung 40: Favorisiertes Assistenzsystem (User-Test VR)

Der Exakte Test nach Fisher deutet daraufhin, dass die Favoritenwahl nicht dadurch beeinflusst wird, ob jemand den Versuch mit den AR-Konturen oder dem Pick-to-Light-System begonnen hat ($p_{\text{Fisher}} = 0,415$).

SUS

Die Ergebnisse aus der SUS zeigen eine signifikant höhere Bewertung des Pick-to-Light-Systems im Vergleich zu den AR-Konturen (Pick-to-Light $78,7 \pm 11,99$ Punkte und die AR-Konturen $74,6 \pm 13,84$ Punkte; $p_{\text{Wilcoxon}} = 0,031$).

Im Vergleich der Gruppe, die den Trainingsfilm sah und der Gruppe, die das Desktoptraining absolvierte, bewertet die Desktoptraining-Gruppe die Usability tendenziell besser (vgl. Tabelle 71).

Das LGM bestätigt den Einfluss der Simulation (AR-Konturen oder Pick-to-Light) auf die Bewertung der Usability durch die SUS (vgl. Tabelle 72).

Tabelle 71: SUS bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe

SUS [Punkte]	MW \pm SD MD (Min – Max)	p _{Mann-Whitney-U}
Trainingsfilm	73,7 \pm 12,99 72,5 (42,5 – 95)	0,057 ^t
Desktoptraining	79,9 \pm 12,43 77,5 (42,5 – 97,5)	

Tabelle 72: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die Usability mittels LGM

	Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
	p _{LGM}			
SUS	0,030	0,189	0,843	0,231

TAM

Beim Vergleich der Einzelitems und der Mittelwerte der wahrgenommenen Nützlichkeit und der wahrgenommenen Bedienbarkeit (vgl. Tabelle 73) zeigen sich durch den Wilcoxon-Test keine statistisch signifikanten Unterschiede. Tendenziell wird das Pick-to-Light-System etwas höher bewertet mit Ausnahme der Aussage „Der Umgang mit dem Assistenzsystem erfordert von mir keine große geistige Anstrengung“.

Tabelle 73: TAM bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System

Variable [Punkte]		AR	PtL	p _{Wilcoxon}
		MW \pm SD MD (Min – Max)		
Wahrgenommene Nützlichkeit	Die Nutzung des Assistenzsystems verbessert meine Arbeitsleistung.	4,4 \pm 1,80 5 (1 – 7)	4,8 \pm 1,75 5 (1 – 7)	0,102
	Die Nutzung des Assistenzsystems erhöht die Produktivität meiner Arbeit.	4,4 \pm 1,85 4 (1 – 7)	4,8 \pm 1,72 5 (1 – 7)	0,077 ^t
	Die Nutzung des Assistenzsystems steigert die Effektivität meiner Arbeit.	4,7 \pm 1,70 5 (1 – 7)	5,0 \pm 1,72 5 (1 – 7)	0,184
	Ich finde das Assistenzsystem nützlich für meine Arbeit.	4,6 \pm 1,78 5 (1 – 7)	4,9 \pm 1,81 5 (1 – 7)	0,351
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist für mich klar und verständlich.	5,6 \pm 1,41 6 (2 – 7)	6,0 \pm 1,02 6 (3 – 7)	0,054 ^t
	Der Umgang mit dem Assistenzsystem erfordert von mir keine große geistige Anstrengung.	5,8 \pm 1,39 6 (3 – 7)	5,7 \pm 1,65 6 (1 – 7)	0,858
	Ich finde das Assistenzsystem leicht zu bedienen.	5,6 \pm 1,36 6 (2 – 7)	5,9 \pm 1,19 6 (3 – 7)	0,080 ^t
	Ich finde, das Assistenzsystem macht ohne Probleme das, was ich möchte.	4,8 \pm 1,59 5 (2 – 7)	5,1 \pm 1,47 5 (2 – 7)	0,151
Wahrgenommene Nützlichkeit (MW)		4,5 \pm 1,74 5 (1 – 7)	4,9 \pm 1,72 5 (1 – 7)	0,111
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (MW)		5,4 \pm 1,25 5,5 (2,8 – 7)	5,7 \pm 1,08 5,8 (3 – 7)	0,230

Im Vergleich der Gruppe, die den Trainingsfilm sah und der Gruppe, die das Desktoptraining absolvierte, bewertet die Desktoptraining-Gruppe die Verständlichkeit des Umgangs mit dem Assistenzsystem signifikant höher (vgl. Tabelle 74).

Tabelle 74: TAM bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe

Variable [Punkte]		Trainings- film	Desktop- training	p _{Mann-Whitney-U}
		MW ± SD MD (Min – Max)		
Wahrgenommene Nützlichkeit	Die Nutzung des Assistenzsystems verbessert meine Arbeitsleistung.	4,4 ± 1,58 5 (1 – 7)	4,8 ± 1,97 5,5 (1 – 7)	0,224
	Die Nutzung des Assistenzsystems erhöht die Produktivität meiner Arbeit.	4,5 ± 1,63 5 (1 – 7)	4,8 ± 1,96 5 (1 – 7)	0,554
	Die Nutzung des Assistenzsystems steigert die Effektivität meiner Arbeit.	4,7 ± 1,49 5 (1 – 7)	5,0 ± 1,92 5,5 (1 – 7)	0,325
	Ich finde das Assistenzsystem nützlich für meine Arbeit.	4,6 ± 1,70 5 (1 – 7)	4,9 ± 1,89 5 (1 – 7)	0,421
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist für mich klar und verständlich.	5,4 ± 1,39 6 (2 – 7)	6,3 ± 0,86 6,5 (4 – 7)	0,012
	Der Umgang mit dem Assistenzsystem erfordert von mir keine große geistige Anstrengung.	5,6 ± 1,47 6 (2 – 7)	5,8 ± 1,58 6 (1 – 7)	0,458
	Ich finde das Assistenzsystem leicht zu bedienen.	5,4 ± 1,47 6 (2 – 7)	6,1 ± 0,93 6 (4 – 7)	0,135
	Ich finde, das Assistenzsystem macht ohne Probleme das, was ich möchte.	4,7 ± 1,44 4 (2 – 7)	5,2 ± 1,61 5 (2 – 7)	0,209
Wahrgenommene Nützlichkeit (MW)		4,6 ± 1,57 5 (1 – 7)	4,9 ± 1,89 5,375 (1 – 7)	0,334
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (MW)		5,3 ± 1,27 5,625 (2,75 – 7)	5,8 ± 0,98 5,875 (3,75 – 7)	0,133

Die einzelnen Items und die Mittelwerte des TAM werden ebenfalls mithilfe des LGM untersucht. Tabelle 75 zeigt einen signifikanten Einfluss des Trainings auf die Aussage „Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist für mich klar und verständlich“. Die Simulation und die Sequenz wirken sich wiederum tendenziell auf diese Aussage aus. Die Simulation wirkt sich zusätzlich tendenziell auf die Aussage „Die Nutzung des Assistenzsystems erhöht die Produktivität meiner Arbeit“ aus.

Tabelle 75: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die wahrgenommene Nützlichkeit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit mittels LGM

		Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
		PLGM			
Wahrgenommene Nützlichkeit	Die Nutzung des Assistenzsystems verbessert meine Arbeitsleistung.	0,124	0,578	0,885	0,547
	Die Nutzung des Assistenzsystems erhöht die Produktivität meiner Arbeit.	0,090 ^t	0,333	1,000	0,728
	Die Nutzung des Assistenzsystems steigert die Effektivität meiner Arbeit.	0,273	0,473	0,945	0,704
	Ich finde das Assistenzsystem nützlich für meine Arbeit.	0,379	0,844	0,894	0,661
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist für mich klar und verständlich.	0,071 ^t	0,301	0,088 ^t	0,049
	Der Umgang mit dem Assistenzsystem erfordert von mir keine große geistige Anstrengung.	0,829	0,979	0,857	0,662
	Ich finde das Assistenzsystem leicht zu bedienen.	0,086	0,694	0,323	0,208
	Ich finde, das Assistenzsystem macht ohne Probleme das, was ich möchte.	0,122	0,212	0,159	0,510
Wahrgenommene Nützlichkeit (MW)		0,168	0,526	0,957	0,653
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (MW)		0,186	0,963	0,273	0,243

ISONORM

In Tabelle 76 werden die einzelnen Fragen zu den Grundsätzen der Dialoggestaltung aus dem ISONORM-Fragebogen dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Systemvarianten können durch den Wilcoxon-Test nicht ermittelt werden. Es existiert ein tendenzieller Unterschied für die Aussage „Das Assistenzsystem lässt sich gut an meine persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen“.

Zur vereinfachten Übersicht werden in Tabelle 77 die einzelnen Aussagen für die Grundsätze als Mittelwerte zusammengefasst. Statistische Unterschiede sind nicht zu erkennen.

In Tabelle 78 wird aufgezeigt, dass die Selbstbeschreibungsfähigkeit, die Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit tendenziell – und die Lernförderlichkeit signifikant – höher von der Desktoptraining-Gruppe als von der Trainingsfilm-Gruppe bewertet werden.

Mithilfe des LGM wird bei den Grundsätzen der Dialoggestaltung untersucht, inwiefern Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training einen Einfluss haben (vgl. Tabelle 79). Es wird deutlich, dass die Simulation signifikant Einfluss auf die Wahrnehmung der Selbstbeschreibungsfähigkeit hat, dass sich der Durchlauf tendenziell auf die Individualisierbarkeit auswirkt, dass

sich die Sequenz signifikant auf die Erwartungskonformität und tendenziell auf die Individualisierbarkeit auswirkt und dass sich das Training tendenziell auf die Individualisierbarkeit und die Lernförderlichkeit auswirkt.

Tabelle 76: ISONORM bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System

Variable [Punkte]		AR	PtL	p _{Wilcoxon}
		MW ± SD MD (Min – Max)		
Aufgaben- angemessen- heit	Das AS bietet alle Funktionen, um die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.	1,4 ± 1,45 2 (-3 – 3)	1,9 ± 1,15 2 (-1 – 3)	0,151
	Das AS erfordert keine überflüssigen Eingaben.	1,4 ± 1,78 2 (-3 – 3)	1,2 ± 1,39 1 (-2 – 3)	0,173
	Das AS ist gut auf die Anforderungen der Arbeit zugeschnitten.	1,3 ± 1,60 2 (-3 – 3)	1,8 ± 1,23 2 (-2 – 3)	0,219
Selbstbe- schreibungs- fähigkeit	Das AS liefert in zureichendem Maße Informationen darüber, welche Eingaben zulässig oder nötig sind.	1,5 ± 1,36 2 (-1 – 3)	1,7 ± 1,15 2 (-1 – 3)	0,683
	Das AS bietet auf Verlangen situationsspezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.	0,6 ± 2,00 1 (-3 – 3)	0,6 ± 1,71 1 (-3 – 3)	0,748
	Das AS bietet von sich aus situationsspezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.	1,1 ± 1,79 1 (-3 – 3)	0,7 ± 1,82 1 (-3 – 3)	0,136
Steuer- barkeit	Das AS erzwingt keine unnötig starre Einhaltung von Bearbeitungsschritten.	0,2 ± 1,80 0 (-2 – 3)	-0,04 ± 1,84 0 (-2 – 3)	0,422
	Das AS erzwingt keine unnötigen Unterbrechungen der Arbeit.	1,4 ± 1,47 2 (-2 – 3)	1,4 ± 1,52 2 (-2 – 3)	0,565
Erwartungs- konformität	Das AS erleichtert die Orientierung, durch eine einheitliche Gestaltung.	2,3 ± 0,69 2 (1 – 3)	2,0 ± 1,26 2 (-2 – 3)	0,131
	Das AS informiert in ausreichendem Maße über das, was es gerade macht.	1,7 ± 1,11 2 (-2 – 3)	1,6 ± 1,08 2 (-1 – 3)	0,796
	Das AS lässt sich durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.	2,4 ± 1,04 3 (-2 – 3)	2,4 ± 0,71 3 (1 – 3)	1,000
Fehlertoleranz	Das AS liefert gut verständliche Fehlermeldungen.	0,2 ± 1,66 0 (-3 – 3)	0,4 ± 1,35 0 (-2 – 3)	0,908
	Das AS erfordert bei Fehlern im Großen und Ganzen einen geringen Korrekturaufwand.	1,5 ± 1,26 2 (0 – 3)	1,6 ± 1,04 2 (-1 – 3)	0,573
	Das AS gibt konkrete Hinweise zur Fehlerbehebung.	0,1 ± 1,94 0 (-3 – 3)	0,4 ± 1,55 0 (-2 – 3)	0,885
Individuali- sierbarkeit	Das AS lässt sich gut an meine persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen.	0,9 ± 1,00 1 (-1 – 2)	0,3 ± 1,57 0 (-2 – 3)	0,079 ^t
	Das AS lässt sich - im Rahmen seines Leistungsumfangs - von mir gut für unterschiedliche Aufgaben passend einrichten.	1,2 ± 1,35 1 (-3 – 3)	1,0 ± 1,32 1 (-3 – 3)	0,393
Lernförder- lichkeit	Das AS erfordert wenig Zeit zum Erlernen.	2,2 ± 1,20 3 (-2 – 3)	2,5 ± 0,96 3 (-1 – 3)	0,165
	Das AS erfordert nicht, dass ich mir viele Details merken muss.	2,1 ± 1,08 2 (-1 – 3)	2,4 ± 0,91 3 (-1 – 3)	0,258
	Das AS ist gut ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.	1,8 ± 1,17 2 (-2 – 3)	1,8 ± 1,27 2 (-1 – 3)	1,000

Bemerkung: AS = Assistenzsystem

Tabelle 77: ISONORM-Mittelwerte bei den AR-Konturen und bei dem Pick-to-Light-System

Variable	AR	PtL	pWilcoxon
	MW ± SD MD (Min – Max)		
Aufgabenangemessenheit	1,4 ± 1,19 1,7 (-1 – 3)	1,6 ± 0,95 1,7 (-0,3 – 3)	0,332
Selbstbeschreibungsfähigkeit	1,1 ± 1,28 1 (-1,7 – 3)	1,0 ± 1,30 1 (-2,3 – 3)	0,541
Steuerbarkeit	0,8 ± 1,44 0,5 (-2 – 3)	0,7 ± 1,26 0,5 (-1,5 – 3)	0,529
Erwartungskonformität	2,1 ± 0,65 2 (0,7 – 3)	2,0 ± 0,79 2 (0,3 – 3)	0,753
Fehlertoleranz	0,6 ± 1,24 0,3 (-1,3 – 3)	0,8 ± 0,94 0,7 (-0,7 – 2,7)	0,671
Individualisierbarkeit	1,1 ± 1,00 1 (-1,5 – 2,5)	0,6 ± 0,99 0,5 (-1 – 3)	0,123
Lernförderlichkeit	2,0 ± 0,87 2 (-0,7 – 3)	2,2 ± 0,76 2,3 (0 – 3)	0,105

Tabelle 78: ISONORM-Mittelwerte bei der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe

Variable	Trainingsfilm	Desktoptraining	pMann-Whitney-U
	MW ± SD MD (Min – Max)		
Aufgabenangemessenheit	1,5 ± 1,06 1,3 (-1 – 3)	1,5 ± 1,11 1,8 (-1 – 3)	0,682
Selbstbeschreibungsfähigkeit	0,7 ± 0,97 0,6 (-1,3 – 2,67)	1,3 ± 1,50 1,8 (-1 – 3)	0,051 ^t
Steuerbarkeit	0,7 ± 1,05 0,5 (-1 – 3)	0,8 ± 1,61 0,5 (-2 – 3)	0,821
Erwartungskonformität	2,0 ± 0,70 2 (0,67 – 3)	2,2 ± 0,74 2,2 (0,33 – 3)	0,234
Fehlertoleranz	0,4 ± 0,96 0,33 (-1,3 – 3)	1,0 ± 1,16 0,66 (-1 – 3)	0,092 ^t
Individualisierbarkeit	0,6 ± 1,03 0,5 (-1,5 – 2,5)	1,1 ± 0,94 1 (-0,5 – 3)	0,074 ^t
Lernförderlichkeit	1,8 ± 0,94 1,8 (-0,67 – 3)	2,4 ± 0,51 2,5 (1 – 3)	0,019

Tabelle 79: Einfluss von Simulation, Durchlauf, Sequenz und Training auf die Grundsätze der Dialoggestaltung mittels LGM

	Simulation	Durchlauf	Sequenz	Training
	pLGM			
Aufgabenangemessenheit	0,687	0,253	0,905	0,843
Selbstbeschreibungsfähigkeit	0,003	0,753	0,500	0,287
Steuerbarkeit	0,389	0,628	0,655	0,920
Erwartungskonformität	0,516	0,516	0,036	0,498
Fehlertoleranz	0,193	0,547	0,692	0,173
Individualisierbarkeit	0,451	0,092 ^t	0,081 ^t	0,053 ^t
Lernförderlichkeit	0,975	0,179	0,971	0,061 ^t

3.2.6 Korrelationsanalysen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg

Die Korrelationen für die AR-Konturen und das Pick-to-Light-System sind in den folgenden Tabellen dargestellt²⁸. Freie Zellen bedeuten, dass keine signifikanten Korrelationen vorliegen.

Bei der Arbeit mit den AR-Konturen (vgl. Tabelle 80) zeigen sich zwischen den HRV-Parametern und den objektiven Leistungsdaten einzelne Korrelationen. Zwischen den HRV-Parametern und dem VFQ sind insbesondere für die Beschwerde „Blendung durch Lichter“ signifikante Zusammenhänge zu finden. Der höchste Korrelationskoeffizient findet sich bei SDNN [ms] ($r = -0,597^{**}$). Für die EZ-Skala finden sich kaum Zusammenhänge zu den HRV-Parametern, wohingegen sich zwischen den Usability- und Nutzerakzeptanzitems vor allem bei Mean NN [ms] und Mean HR [1/min] signifikante Zusammenhänge finden lassen.

Bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System (vgl. Tabelle 81) zeigen sich zwischen den HRV-Parametern und den objektiven Leistungsdaten zwei schwach positive Korrelationen bei der Dauer der Montage des ersten Wegeventils. Zwischen den HRV-Parametern und dem VFQ sind insbesondere für die Beschwerde „Schwierigkeiten Linien zu verfolgen“ und „Blendung durch Lichter“ signifikante Zusammenhänge zu finden. Für die EZ-Skala finden sich für „Schläfrigkeit“ die meisten und stärksten negativen Zusammenhänge zu den HRV-Parametern. Bei den Usability- und Nutzerakzeptanzitems ist nur zwischen „Erwartungskonformität“ und SD HR [1/min] ein mittlerer negativer Zusammenhang zu finden.

In Tabelle 82 und Tabelle 83 werden die Korrelationen zwischen den Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten dargestellt. Für die AR-Konturen zeigen sich insbesondere zwischen den EZ-Faktoren und der Montagedauer des zweiten Wegeventils Zusammenhänge, während bei dem Pick-to-Light-System insbesondere die Fehlerzahl beim ersten Wegeventil und die EZ-Faktoren Zusammenhänge aufzeigen.

Sowohl bei der Arbeit mit den AR-Konturen (vgl. Tabelle 84) als auch bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System (vgl. Tabelle 85) lassen sich zwischen den Beschwerden des VFQ und den Fragebögen zur Usability und Nutzerakzeptanz schwache bis mittlere negative Korrelationen erkennen. Schwache bis mittlere Assoziationen zwischen der RSME und den Usability- und Nutzerakzeptanzitems werden deutlich. Zwischen den Binärfaktoren der EZ-Skala und den Usability- und Nutzerakzeptanzfragebögen lassen sich bei beiden Assistenzvarianten schwache bis mittlere positive Zusammenhänge erkennen.

Zusammenhänge zwischen den Usability- und Nutzerakzeptanzfragebögen und den objektiven Leistungsdaten zeigen sich ausschließlich bei den AR-Konturen (vgl. Tabelle 86), jedoch

²⁸ Bei allen Berechnungen wurden absolute Werte verwendet. Bei den HRV-Daten wurden die 5-Minuten-Intervalle verwendet.

nicht beim Pick-to-Light-System. Daher wird für das Pick-to-Light-System auf eine tabellarische Darstellung verzichtet.

Sowohl bei der Arbeit mit den AR-Konturen als auch bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System ergeben sich einige meist negative Zusammenhänge zwischen den Fragebögen zur Ermittlung der subjektiven (visuellen) Beanspruchung (vgl. Tabelle 87 und Tabelle 88). Der höchste Korrelationskoeffizient findet sich bei den AR-Konturen zwischen „Kopfschmerzen“ und „Schläfrigkeit“ ($r = 0,599^{**}$).

Es ergeben sich sowohl bei der Arbeit mit den AR-Konturen (vgl. Tabelle 89), als auch bei dem Pick-to-Light-System (vgl. Tabelle 90) einige geringe bis hohe positive Zusammenhänge zwischen den Fragebögen zur Usability und Nutzerakzeptanz. Der höchste Korrelationskoeffizient findet sich bei den AR-Konturen zwischen der SUS und der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit ($r = 0,798^{***}$).

Tabelle 80: Korrelationen für die AR-Konturen (HRV vs. objektive Leistungsdaten, VFQ, EZ-Skala, RSME, Usability / Nutzerakzeptanz)

AR	zeitbezogene HRV-Parameter							frequenzbezogene HRV-Parameter							nicht-lineare HRV-Parameter			
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
objektive Leistungsdaten																		
WV vP Dauer [s]		-0,436*																-0,425*
WV vP Fehlerzahl				0,585**														
WV nP Dauer [s]																		
WV nP Fehlerzahl							0,455*			-0,423*								
VFQ																		
Trock A	-0,428*																	
Trän A																		
A gereiz brenn	-0,515*		0,515*															
Schmerz A																		-0,452*
Schwere A																		
Schw Linien verf	-0,594**		0,594**															
Schw scharf sehen	-0,553**		0,553**															
Spring Text																		
Verschw Buchst																		
Blend d Licht		-0,597**		-0,442*	-0,456*	-0,458*	-0,475*					0,453*	-0,453*	0,453*	-0,456*	-0,562**		
Verschw Sicht																		
Doppels																		
Kopfschm																		

AR	zeitbezogene HRV-Parameter							frequenzbezogene HRV-Parameter							nicht-lineare HRV-Parameter			
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
Nackenschm																		
Übelk								0,475*										
G Ermüd																		
EZ-Skala																		
MOT																		
BEA																		
AKT																		
EFF																		
TEN																		
DEF								-0,488*										
ANBE																		
KON																		
SOZ																		
SICH																		
STIM																		
SPAN																		
ERH								-0,482*	-0,439*									
SCHL								-0,438*										
RSME																		
RSME																		
Usability und Nutzerakzeptanz																		
SUS																		

AR	zeitbezogene HRV-Parameter							frequenzbezogene HRV-Parameter							nicht-lineare HRV-Parameter			
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
Wahrgenommene Nützlichkeit	0,427*		-0,444*					-0,464*										
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit				-0,502*														
Aufgabenangemessenheit	0,607**		-0,613**															
Selbstbeschreibungsfähigkeit																		
Steuerbarkeit	0,473*		-0,478*															
Erwartungskonformität	0,505*		-0,506*	-0,687*														
Fehlertoleranz																		
Individualisierbarkeit																		
Lernförderlichkeit																		

Bemerkung: WV vP = Wegeventil vor dem Puzzle; WV nP = Wegeventil nach dem Puzzle

Tabelle 81: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (HRV vs. objektive Leistungsdaten, VFQ, EZ-Skala, RSME, Usability / Nutzerakzeptanz)

PtL	zeitbezogene HRV-Parameter							frequenzbezogene HRV-Parameter						nicht-lineare HRV-Parameter				
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
objektive Leistungsdaten																		
WV vP Dauer [s]		0,480*														0,493*		
WV vP Fehlerzahl																		
WV nP Dauer [s]																		
WV nP Fehlerzahl																		
VFQ																		
Trock A																		
Trän A																		
A gereiz brenn																		
Schmerz A																		
Schwere A	-0,491*		0,486*															
Schw Linien verf	-0,499*		0,498*			-0,424*						0,474*	-0,474*	0,474*	-0,474*		0,474*	
Schw scharf sehen																		
Spring Text																		
Verschw Buchst																		
Blend d Licht		-0,471*		-0,449*	-0,497*	-0,497*	-0,497*					0,497*	-0,497*	0,497*	-0,497*	-0,471*		
Verschw Sicht	-0,424*		0,424*															
Doppels																		
Kopfschm																		
Nackenschm																		

PtL	zeitbezogene HRV-Parameter							frequenzbezogene HRV-Parameter						nicht-lineare HRV-Parameter				
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
Übelk																		
G Ermüd																		
EZ-Skala																		
MOT																		
BEA																		
AKT																		
EFF																		
TEN																		
DEF					-0,426*										-0,426*			
ANBE																		
KON																		
SOZ																		
SICH																		
STIM										-0,436*								
SPAN																		
ERH																		
SCHL		-0,599**		-0,512*			-0,435*									-0,546**		
RSME																		
RSME																		
Usability und Nutzerakzeptanz																		
SUS																		

Ptl	zeitbezogene HRV-Parameter							frequenzbezogene HRV-Parameter							nicht-lineare HRV-Parameter			
	Mean NN [ms]	SDNN [ms]	Mean HR [1/min]	SD HR [1/min]	RMSSD [ms]	NN 50 [count]	pNN 50 [%]	LF-Peak [Hz]	HF-Peak [Hz]	LF [%]	HF [%]	LF nu	HF nu	LF/HF	SD1 [ms]	SD2 [ms]	DFA1	DFA2
Wahrgenommene Nützlichkeit																		
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit																		
Aufgabengemessenheit																		
Selbstbeschreibungsfähigkeit																		
Steuerbarkeit																		
Erwartungskonformität				-0,532*														
Fehlertoleranz																		
Individualisierbarkeit																		
Lernförderlichkeit																		

Bemerkung: WV vP = Wegeventil vor dem Puzzle; WV nP = Wegeventil nach dem Puzzle

Tabelle 82: Korrelationen für die AR-Konturen (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten)

AR	WV vP Dauer [s]	WV vP Fehlerzahl	WV nP Dauer [s]	WV nP Fehlerzahl
VFQ				
Trock A				
Trän A				
A gereiz brenn				
Schmerz A				
Schwere A				
Schw Linien verf	0,411*			
Schw scharf sehen				
Spring Text				
Verschw Buchst				
Blend d Licht	0,408*			
Verschw Sicht				
Doppels				
Kopfschm				
Nackenschm				
Übelk				
G Ermüd				
RSME				
RSME			0,416*	
EZ-Skala				
MOT			-0,584**	
BEA				
AKT			-0,509*	
EFF			-0,561**	
TEN				
DEF				
ANBE			-0,525**	
KON			-0,463*	
SOZ				
SICH			-0,577**	
STIM			-0,429*	
SPAN				
ERH				
SCHL				

Bemerkung: WV vP = Wegeventil vor dem Puzzle; WV nP = Wegeventil nach dem Puzzle

Tabelle 83: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und objektive Leistungsdaten)

PtL	WV vP Dauer [s]	WV vP Fehlerzahl	WV nP Dauer [s]	WV nP Fehlerzahl
VFQ				
Trock A				
Trän A				
A gereiz brenn				
Schmerz A				
Schwere A				
Schw Linien verf				
Schw scharf sehen				
Spring Text				0,436*
Verschw Buchst				
Blend d Licht				
Verschw Sicht				
Doppels				0,599**
Kopfschm				
Nackenschm	0,511*			
Übelk				
G Ermüd				
RSME				
RSME				
EZ-Skala				
MOT		0,508*		
BEA		0,484*		
AKT		0,497*		
EFF				
TEN				
DEF		0,407*		
ANBE		0,476*		
KON		0,527**	-0,430*	
SOZ				
SICH			-0,478*	
STIM		0,486*		
SPAN				
ERH				
SCHL				

Bemerkung: WV vP = Wegeventil vor dem Puzzle; WV nP = Wegeventil nach dem Puzzle

Tabelle 84: Korrelationen für die AR-Konturen (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und Usability / Nutzerakzeptanz)

AR	SUS	Wahrgenommene Nützlichkeit	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Aufgabenangemessenheit	Selbstbeschreibungsfähigkeit	Steuerbarkeit	Erwartungskonformität	Fehlertoleranz	Individualisierbarkeit	Lernförderlichkeit
VFQ										
Trock A										
Trän A										
A gereiz brenn										
Schmerz A										
Schwere A										
Schw Linien verf								-0,406*		
Schw scharf sehen							-0,490*			
Spring Text										-0,414*
Verschw Buchst										
Blend d Licht										-0,417*
Verschw Sicht										
Doppels										-0,412*
Kopfschm					-0,424*					
Nackenschm										
Übelk			-0,467*				-0,415*			
G Ermüd				-0,420*						
RSME										
RSME	-0,522**	-0,542**	-0,532**	-0,597**						
EZ-Skala										
MOT	0,420*	0,472*				0,622**				

AR	SUS	Wahrgenommene Nützlichkeit	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Aufgabenangemessenheit	Selbstbeschreibungsfähigkeit	Steuerbarkeit	Erwartungskonformität	Fehlertoleranz	Individualisierbarkeit	Lernförderlichkeit
BEA		0,452*		0,411*						
AKT	0,444*	0,462*				0,583**				
EFF						0,548**				
TEN		0,477*								
DEF										
ANBE		0,404*				0,594**				
KON	0,442*	0,465*				0,459*				
SOZ						0,557**				
SICH										
STIM		0,435*								
SPAN										
ERH										
SCHL										

Tabelle 85: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Subjektive (visuelle) Beanspruchung und Usability / Nutzerakzeptanz)

PtL	SUS	Wahrgenommene Nützlichkeit	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Aufgabenangemessenheit	Selbstbeschreibungsfähigkeit	Steuerbarkeit	Erwartungskonformität	Fehlertoleranz	Individualisierbarkeit	Lernförderlichkeit
VFQ										
Trock A				-0,405*						
Trän A										
A gereiz brenn			-0,401*						-0,407*	
Schmerz A							-0,415*			

PtL	SUS	Wahrgenommene Nützlichkeit	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Aufgabenangemessenheit	Selbstbeschreibungsfähigkeit	Steuerbarkeit	Erwartungskonformität	Fehlertoleranz	Individualisierbarkeit	Lernförderlichkeit
Schwere A								-0,420*		
Schw Linien verf										
Schw scharf sehen										
Spring Text		-0,421*								
Verschw Buchst			-0,443*							
Blend d Licht			-0,420*							
Verschw Sicht			-0,472*				-0,506**			-0,408*
Doppels										
Kopfschm							-0,404*			
Nackenschm							-0,431*			
Übelk			-0,407*							
G Ermüd										
RSME										
RSME	-0,531**		-0,473*	-0,518**		-0,454*				
EZ-Skala										
MOT	0,535**	0,401*				0,469*				
BEA										
AKT	0,439*	0,442*			0,402*	0,429*				
EFF	0,606**	0,475*		0,404*		0,411*			0,459*	
TEN										
DEF							0,417*			
ANBE	0,479*	0,417*			0,430*	0,531**				

PtL	SUS	Wahrgenommene Nützlichkeit	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Aufgabenangemessenheit	Selbstbeschreibungsfähigkeit	Steuerbarkeit	Erwartungskonformität	Fehlertoleranz	Individualisierbarkeit	Lernförderlichkeit
KON										
SOZ	0,567**	0,406*	0,401*			0,500*			0,457*	
SICH	0,543**									
STIM										
SPAN										
ERH										
SCHL										

Tabelle 86: Korrelationen für die AR-Konturen (Objektive Leistungsdaten und Usability / Nutzerakzeptanz)

AR	WV vP Dauer [s]	WV vP Fehlerzahl	WV nP Dauer [s]	WV nP Fehlerzahl
SUS		-0,407*	-0,560**	
Wahrgenommene Nützlichkeit				
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit		-0,529**	-0,555**	
Aufgabenangemessenheit				-0,513*
Selbstbeschreibungsfähigkeit				
Steuerbarkeit				
Erwartungskonformität	-0,475*	-0,570**		
Fehlertoleranz				
Individualisierbarkeit				
Lernförderlichkeit				0,411*

Bemerkung: WV vP = Wegeventil vor dem Puzzle; WV nP = Wegeventil nach dem Puzzle

Tabelle 87: Korrelationen für die AR-Konturen (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)

AR	RSME	MOT	BEA	AKT	EFF	TEN	DEF	ANBE	KON	SOZ	SICH	STIM	SPAN	ERH	SCHL
RSME	1		-0,459*					-0,497*						-0,410*	
Trock A															
Trän A															
A gereiz brenn														-0,456*	
Schmerz A			-0,418*				-0,521**							-0,516**	
Schwere A							-0,475*							-0,475*	-0,530**
Schw Linien verf															
Schw scharf sehen															
Spring Text			-0,440*									-0,411*		-0,425*	
Verschw Buchst														-0,418*	
Blend d Licht															0,404*
Verschw Sicht			-0,442*			-0,460*						-0,401*		-0,522**	
Doppels			-0,440*									-0,413*		-0,424*	
Kopfschm							-0,410*								-0,599**
Nackenschm															
Übelk															-0,425*
G Ermüd			-0,510**			-0,437*	-0,541**						-0,397*	-0,543**	

Tabelle 88: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung)

PTL	RSME	MOT	BEA	AKT	EFF	TEN	DEF	ANBE	KON	SOZ	SICH	STIM	SPAN	ERH	SCHL
RSME	1						-0,489*			-0,447*					-0,412*
Trock A															
Trän A															
A gereiz brenn														-0,457*	
Schmerz A															
Schwere A															
Schw Linien verf															
Schw scharf sehen															
Spring Text												-0,423*			
Verschw Buchst															
Blend d Licht															
Verschw Sicht															
Doppels												-0,442*			
Kopfschm	0,493*						-0,398*					-0,413*			-0,412*
Nackenschm															
Übelk	0,473*														
G Ermüd															

Tabelle 89: Korrelationen für die AR-Konturen (Fragebögen zur Usability / Nutzerakzeptanz)

AR	Wahrgenommene Nützlichkeit	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	SUS
SUS	0,651***	0,798***	1
Aufgabenangemessenheit	0,706***		0,487*
Selbstbeschreibungsfähigkeit	0,491*		0,428*
Steuerbarkeit			
Erwartungskonformität		0,711***	0,542**
Fehlertoleranz			
Individualisierbarkeit	0,441*	0,421*	0,405*
Lernförderlichkeit		0,578**	0,559**

Tabelle 90: Korrelationen für das Pick-to-Light-System (Fragebögen zur Usability / Nutzerakzeptanz)

PtL	Wahrgenommene Nützlichkeit	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	SUS
SUS	0,643**	0,471*	1
Aufgabenangemessenheit	0,623**	0,587**	0,635**
Selbstbeschreibungsfähigkeit			
Steuerbarkeit		0,475*	0,566**
Erwartungskonformität	0,491*	0,543**	0,471*
Fehlertoleranz			
Individualisierbarkeit	0,564**		
Lernförderlichkeit			0,510**

3.3 User-Test (Real)

Die Ergebnisse des realen User-Tests werden im Folgenden dargestellt.

3.3.1 Soziodemografische Angaben und Statusdaten der Stichprobe

Von 11 freiwilligen, klinisch gesunden Studienteilnehmern sind 7 männlich (64 %) und 4 weiblich (36 %). Das durchschnittliche Alter der Probanden liegt bei $26,2 \pm 3,82$ Jahren (Min 22, Max 32). Die Frauen sind im Durchschnitt $24,3 \pm 3,20$ Jahre alt, die Männer $27,3 \pm 3,90$ Jahre alt. Beide Gruppen sind in den soziodemografischen und sozioökonomischen Merkmalen vergleichbar. 5 der 11 Probanden tragen Kontaktlinsen oder eine Brille. Die Sehleistung (Visus, Phorie, Stereosehen, Farbsehen, Gesichtsfeld) ist bei allen Probanden ausreichend bzw. bestkorrigiert, sodass sie am Versuch teilnehmen können. Augenerkrankungen liegen bei keinem Probanden vor. Die Probanden verbringen nach eigenen Angaben zwischen 2,5 und 9,5 Stunden täglich am Bildschirm (im Durchschnitt $7,1 \pm 2,22$ Stunden).

Die Erfahrungen der Probanden mit digitalen Assistenzsystemen finden sich in Abbildung 41.

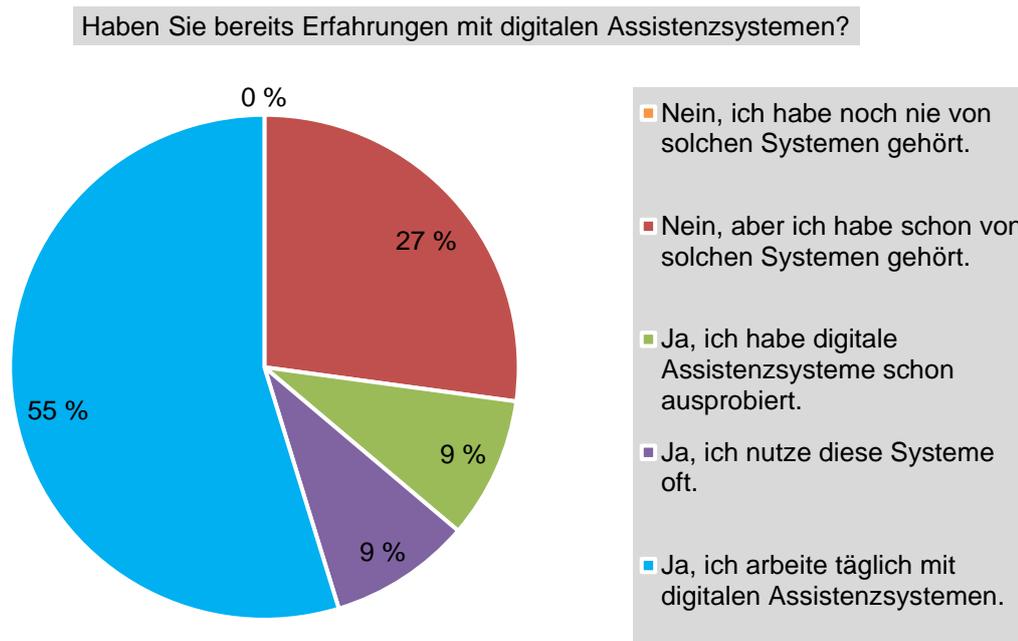


Abbildung 41: Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen (User-Test Real)

Kein Proband muss aufgrund körperlicher Beschwerden, der Einnahme bestimmter Medikamente, dem Tabak- oder Alkoholkonsum von der Teilnahme der Studie ausgeschlossen werden. Bluthochdruck und Diabetes mellitus liegen in der Anamnese bei keinem der Probanden vor. Ein Proband gibt an, an Herzrhythmusstörungen zu leiden, nimmt allerdings keine Medikamente dagegen ein. Seine EKG-Aufnahme konnte, trotz einer sehr geringen Anzahl von Extrasystolen, in die Auswertung mit einbezogen werden.

3.3.2 Objektive physiologische Beanspruchungsdaten

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass ein Proband für die HRV-Auswertung aufgrund einer technischen Störung ausgeschlossen werden musste. Für alle anderen Berechnungen und Auswertungen des realen User-Tests gilt $n = 11$.

Tabelle 91 zeigt die HRV-Parameter im Vergleich der fünfminütigen Ruhephase und der Montage. Mean HR [1/min] ist in der Ruhephase signifikant geringer als während der Montage. Zudem zeigen sich tendenzielle Unterschiede bei Mean NN [ms], RMSSD [ms] und SD1 [ms].

Tabelle 91: HRV-Parameter bei der Ruhephase und der Montage

HRV-Parameter	Ruhephase	Montage	pWilcoxon
	MW \pm SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	698,6 \pm 114,51	667,1 \pm 113,11	0,074 ^t
SDNN [ms]	52,3 \pm 12,38	51,3 \pm 13,23	0,799
Mean HR [1/min]	88,0 \pm 14,87	92,9 \pm 16,42	0,022
SD HR [1/min]	6,6 \pm 1,95	6,9 \pm 1,48	0,333
RMSSD [ms]	24,2 \pm 6,48	27,3 \pm 8,71	0,074 ^t
NN 50 [count]	21,4 \pm 17,47	30,8 \pm 23,66	0,152
pNN 50 [%]	5,3 \pm 5,22	7,5 \pm 6,37	0,444
frequenzbezogene Parameter			
LF-Peak [Hz]	0,06 \pm 0,028	0,06 \pm 0,034	0,917
HF-Peak [Hz]	0,15 \pm 0,001	0,15 \pm < 0,001	0,317
LF [%]	47,6 \pm 15,08	51,8 \pm 9,89	0,241
HF [%]	11,8 \pm 4,87	14,4 \pm 8,65	0,575
LF nu	78,9 \pm 9,64	79,0 \pm 10,45	0,799
HF nu	21,1 \pm 9,64	21,0 \pm 10,45	0,799
LF/HF	4,8 \pm 2,71	4,8 \pm 2,60	0,799
zeitbezogene Parameter			
SD1 [ms]	17,1 \pm 4,60	19,3 \pm 6,16	0,066 ^t
SD2 [ms]	71,8 \pm 16,90	69,7 \pm 18,29	0,721
DFA1	1,5 \pm 0,16	1,4 \pm 0,18	0,386
DFA2	0,8 \pm 0,23	0,8 \pm 0,13	0,878

In Tabelle 92 werden die HRV-Daten des realen User-Test und des Durchlaufs mit den AR-Konturen aus dem virtuellen User-Test (vgl. Abschnitt 3.2.2) gegenübergestellt. Durch den Mann-Whitney-U-Test werden signifikant höhere Werte im realen User-Test bei SD HR [1/min] und LF [%] deutlich, während HF [%] im realen User-Test signifikant geringer ist.

Tabelle 92: HRV-Parameter bei der Montage bei dem realen und virtuellen User-Test

HRV-Parameter	User-Test (Real)	User-Test (VR)	p _{Mann-Whitney-U}
	MW ± SD		
zeitbezogene Parameter			
Mean NN [ms]	667,1 ± 113,11	750,8 ± 126,46	0,100
SDNN [ms]	51,3 ± 13,23	50,6 ± 16,84	0,952
Mean HR [1/min]	92,9 ± 16,42	82,4 ± 13,75	0,100
SD HR [1/min]	6,9 ± 1,48	5,4 ± 1,47	0,006
RMSSD [ms]	27,3 ± 8,71	31,0 ± 17,38	0,734
NN 50 [count]	30,8 ± 23,66	42,3 ± 46,13	0,889
pNN 50 [%]	7,5 ± 6,37	11,6 ± 14,61	0,704
frequenzbezogene Parameter			
LF-Peak [Hz]	0,06 ± 0,034	0,06 ± 0,021	0,920
HF-Peak [Hz]	0,15 ± < 0,001	0,20 ± 0,084	0,163
LF [%]	51,8 ± 9,89	41,3 ± 14,66	0,035
HF [%]	14,4 ± 8,65	47,2 ± 14,74	< 0,001
LF nu	79,0 ± 10,45	79,6 ± 10,89	0,734
HF nu	21,0 ± 10,45	20,4 ± 10,89	0,734
LF/HF	4,8 ± 2,60	5,8 ± 4,13	0,734
nicht-lineare Parameter			
SD1 [ms]	19,3 ± 6,16	21,9 ± 12,81	0,734
SD2 [ms]	69,7 ± 18,29	67,7 ± 21,90	0,857
DFA1	1,4 ± 0,18	1,38 ± 0,242	0,345
DFA2	0,8 ± 0,13	0,87 ± 0,209	0,434

3.3.3 Subjektive Beanspruchungsdaten

Tabelle 93 zeigt die erlebte, geistige Anstrengung der Probanden im User-Test mit dem realen Prototypen verglichen mit der erlebten geistigen Anstrengung der Probanden bei der Wegeventilmontage unter VR mit den AR-Konturen (User-Test VR). Mithilfe des Mann-Whitney-U-Test konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Tabelle 93: RSME bei dem realen und virtuellen User-Test

Teilstudie	RSME [Punkte]	p _{Mann-Whitney-U}
	MW ± SD MD (Min – Max)	
User-Test (Real)	45,5 ± 27,70 40 (10 – 100)	0,973
User-Test (VR)	47,8 ± 37,11 40 (5 – 180)	

3.3.4 Objektive Leistungsdaten

Es wurden explizit keine objektiven Leistungsdaten in diesem Versuch erfasst. Rein deskriptiv zeigt sich eine Montagedauer von 8 bis 20 Minuten (durchschnittlich 13,7 ± 3,97 Minuten).

3.3.5 Usability-Daten

Im Folgenden werden die qualitativen Daten aus den Interviews, die im Schnitt 5:42 Minuten (Min 3:53 Minuten; Max 9:11 Minuten) dauerten, und Beobachtungen zusammenfassend für die einzelnen Kategorien dargestellt.

Einzelschrittanweisung

Es wird deutlich, dass die Einzelschrittanweisung ca. von der Hälfte der Probanden nicht direkt wahrgenommen wird. Sie wird häufig erst im Laufe des Montageprozesses entdeckt. Dies ist u. a. daran zu erkennen, dass Probanden im Lauten Denken verbalisieren, dass sie nicht wissen, welches Werkzeug sie für den jeweiligen Montageschritt benötigen. Diese Information ist jedoch in der Einzelschrittanweisung vorhanden. Beispielsweise entdeckt Proband 5 bei der Montage des Hubbegrenzers die Einzelschrittanweisung: *„Das habe ich vorher gar nicht gesehen!“*. Es gibt allerdings auch Probanden, die sich von Beginn an vorrangig an der Einzelschrittanweisung orientieren: *„Den eigentlichen Schritt oben finde ich sehr gut, da [...] orientiert man sich eigentlich am meisten. Jedenfalls ging mir das so. Die Ansicht war gut“* (Interview 7, Z. 60-61).

Verbesserungsvorschläge der Probanden, die sich aus den Interviews und den Beobachtungen während der Montage ergeben, sind das Einfügen der Bauteilnummer in der Einzelschrittanweisung (*„Da hätte man vielleicht oben, an der [Einzelschrittanweisung] gleich da direkt die Bauteilnummer mitanzeigen können. Weil dafür musste ich immer zwischen den beiden also zwischen [...] [Einzelschrittanweisung] und [...] [Gesamtliste] wechseln“* (Interview 8, Z. 38-41)) und die farbliche Hervorhebung der Einzelschrittanweisung (*„Ja also das rechts [Montageschrittanleitung] ist auf jeden Fall viel dominanter mit dem Grün und dann das Bild und ich denke dadurch nehme ich die obere Ecke [Einzelschrittanweisung] gar nicht so richtig wahr“* (Interview 6, Z. 66-67)).

Montageschrittanleitung

Die Montageschrittanleitung wird von den Probanden grundsätzlich als gute Hilfestellung empfunden (*„Wenn man jetzt keine Ahnung hat, was gemacht wird und man es zum ersten Mal macht, das ist halt schon eine starke Hilfestellung, [...], das ist ja erstmal eine Schritt-für-Schritt-Anleitung [...] und auch, dass man auch wieder zurückspulen kann“* (Interview 1, Z. 21-24)). Es wird bemängelt, dass die Montageschrittanleitung keine Informationen zum benötigten Werkzeug liefert. Dadurch, dass die Bauteilnummer nur in der Montageschrittanleitung und das Werkzeug nur in der Einzelschrittanweisung aufgeführt sind, müssen die Probanden zwischen den Anzeigen wechseln. Es wird der Wunsch geäußert, auf die Auflistung von Einzelteilen zu verzichten, wenn das Bauteil schon vormontiert ist (*„Ich würde z. B., wenn ein Bauteil*

schon montiert ist, nicht die Einzelbestandteile auflisten, weil ich dann meine, ‚Okay, es müssen vier Teile sein‘. Im Endeffekt muss es aber nur ein Teil sein, was zu einem zusammengefasst ist, dann könnte man es so ein bisschen übersichtlicher machen" (Interview 3, Z. 32-35).

Probleme werden zudem hinsichtlich Schriftgröße und Informationsfülle benannt:

- *"Die Folgeschritte sind meiner Meinung nach irgendwie unnötig. Es lenkt eher ab, da nochmal die ganzen Details zu ‚nem Schritt zu sehen, der erst fünf Schritte später kommt. Entweder man macht's irgendwie nicht in so ‚ner Liste, sondern irgendwie grafisch, sozusagen als [...] Flussdiagramm oder man lässt die ganzen Details weg, dass man nur sagt ‚Okay, da kommt jetzt noch was‘, aber keine [...] Artikelnummer, keine Typenbezeichnung usw. Das würde ich dann vielleicht noch ‚nen bisschen aufgeräumter finden."* (Interview 7, Z. 61-71)
- *„Es ist auch relativ viel Information drüber und drunter."* (Interview 8, Z. 57-58)
- *"Aber das Problem war halt, dass die Zeile, wo man quasi das lesen sollte, was gemacht werden sollte, dass da die Wörter abgeschnitten waren."* (Interview 1, Z. 52-53)

CAD-Modell

Das CAD-Modell wird von den Probanden nur genutzt, wenn aus der Einzelanweisung oder der Montageschrittanleitung nicht klar hervorgeht, wie ein asymmetrisches Bauteil, z. B. Kolben, Hubbegrenzer oder Spule, montiert wird: *"[Ich] hab‘ natürlich jetzt die CAD-Ansicht nicht benutzt, nur einmal benutzt ja, um zu gucken, wie die Kolben orientiert sind. Hat mir aber nicht geholfen. Das heißt, ich konnte nicht die Orientierung der Kolben erkennen auf dem CAD. [...] Die Unterschiede waren zu klein [...] auf dem CAD. Das hab‘ ich dann durch Probieren gemacht"* (Interview 7, Z. 47-54). Unter anderem durch diese Äußerung wird deutlich, dass die integrierten Funktionen des CAD-Modells (z. B. Zoomen, Drehen einzelner Bauteile oder Baugruppen) oftmals nicht in vollem Umfang angewendet werden. Die Ansichten zur Sinnhaftigkeit des CAD-Modells sind unterschiedlich. Positiv wird bemerkt: *"Auch, dass man es auf der rechten Seite nochmal schematisch gesehen hat, hat definitiv nicht geschadet. Und dass das kleine Teil immer oben, welches ich einsetzen sollte, zu sehen war, weil ich sonst nicht sicher gewesen wäre, in welche Kiste ich greifen soll. Das hat mir auch gefallen"* (Interview 4, Z. 6-9). Doch nicht alle Probanden empfinden das CAD-Modell als zwingend notwendig: *"Hätte ich mir vielleicht beim zweiten Mal nochmal angeguckt. Aber eigentlich war das ok. Es ist ‚nice to have‘ aber eigentlich, vielleicht um nachher nochmal zu verstehen, was da wo einrastet oder so"* (Interview 5, Z. 76-78), *"Bei dem rechten Bildschirm hab‘ ich ja eigentlich nicht viel rumgespielt. [Ich] hab‘ [...] das Gefühl, da konnte man mehr machen, als wirklich nötig ist, vielleicht lenkt das irgendwann ab"* (Interview 10, Z. 49-51).

AR-Konturen

Die AR-Konturen werden in dem Assistenzsystem von den Probanden als große Hilfe eingeschätzt, da sie Sicherheit in der Montage bieten (*"Ich fand es praktisch, weil ich nach jedem Schritt gucken konnte, ob das auf der Zeichnung mit meinem übereinstimmte und das hat mir viel Sicherheit gegeben, ob ich das gemacht habe, was in dem Schritt verlangt wurde"* (Interview 4, Z. 3-5)). Dabei dienen insbesondere die dominante Konturenfarbe und der Kontrast zur schnellen Orientierung (*"Den Kontrast fand ich gut, zwischen dem Schwarz-Weiß-Bild und der [...] schön knalligen farbigen Linie. Ja also genau, dass man halt, also dieser schnelle visuelle Eindruck, dass ich's nicht erst, also noch irgendwas kompliziert lesen muss"* (Interview 5, Z. 67-71)).

Beschriftung der Bauteile / Baukästen

Die Beschriftung der Bauteile in der Anzeige sowie die Beschriftung auf den Bauteilkästen dienen den Probanden zur Sicherheit damit das richtige Bauteil gegriffen wird: *"Also ich fand es sehr gut, schon allein das mit den Nummern, mit der Beschriftung war es eigentlich nahezu unmöglich das falsche Teil zu nehmen"* (Interview 11, Z. 65-66). Gewünscht wird eine andere Neigung der Bauteilkästen: *"Und was mir da aufgefallen ist, die Schilder, wo die Nummer dran steht, die sind leicht nach vorne nach unten gekippt. Und wenn ich von oben drauf gucke, dann ist es relativ schwer, die Zahlen zu lesen. Das heißt ich muss eigentlich immer so ein bisschen gucken ,Welche Zahl ist das jetzt genau?'"* (Interview 8, Z. 6-13). Probandin 9 merkt an: *"Die Beschreibung der kleineren Bauteile, ähm die könnte man vielleicht kürzer fassen, anstatt irgendwie D1 und dann sechs Ziffern, einfach nur D1 nennen beispielsweise"* (I. 9, Z. 61-62).

Statusanzeige

Die Statusanzeige, wieviel Prozent der Montage bereits erledigt ist, fällt den Studienteilnehmern spät während der Montage auf und wird zumeist kaum beachtet. Ihre Notwendigkeit ist damit zu diskutieren: *"Ich fand, das ist mir aber erst ehrlich gesagt erst zum Schluss aufgefallen, ganz nett die Skala bzw. dass angezeigt wird, dass bei, wieviel Prozent einem schon fertig ist, in der in dem Bauvorgang. Also, dass bei 80 Prozent, dass ich mich innerlich drauf einstellen kann ,Okay, es kommen noch ein, zwei Schritte' und mehr passiert nicht."* (Interview 9, Z. 19-23).

(Anstrengungs-)Empfinden / User Experience

Die Probanden fühlen sich durch das Assistenzsystem gut unterstützt und empfinden den Montagevorgang nicht als anstrengend (*"Nö, also im Nachhinein war's eigentlich nicht so anstrengend"* (Interview 2, Z. 52-53)). Einige berichten von Spaß bei der Montage (*"Ja, hat Spaß gemacht [...] und man hat sich schon unterstützt gefühlt durch das System einfach, also man*

wusste ‚Okay, sollte ich was falsch gemacht haben, würde ich es ja sehen, in der Kamera‘ (Interview 3, Z. 51-54)). Jedoch vermuten die Probanden, dass häufiges Wiederholen der Montage zu Monotonie und ggf. zur Unterforderung (*„War völlig in Ordnung, war entspannt. Ich hab’s jetzt zum ersten Mal gemacht, wenn ich’s öfter machen würde, würde es mich wahrscheinlich langweilen, aber ja, war selbsterklärend und völlig in Ordnung“* (Interview 5, Z. 53-55)) bzw. auch zu einer höheren Beanspruchung und einem stärkeren Anstrengungsgefühl führen kann (*„Ich sag mal für ein Teil bestimmt sehr spaßig, aber, wenn man das jetzt tausend Mal macht, da ist’s natürlich anstrengend“* (Interview 7, Z. 102-104)).

Lerneffekt / Lernförderlichkeit

Der Lerneffekt, den das Assistenzsystem hervorruft, wird von den Probanden als sehr hoch eingeschätzt. Es wird die Behauptung aufgestellt, dass *„je öfter man das macht, desto weniger braucht man den Assistenten“* (Interview 8, Z. 95-96). Bei einem dauerhaften Einsatz des Assistenzsystems könnte dieses zur Kontrolle dienen: *„Vielleicht ist es noch gut um abzuhaken, dass man auch wirklich nichts vergisst. Nicht, dass man dann, wenn man so einmal drin ist, doch irgendeinen Schritt überspringt und dann fehlt da was, das wäre ja blöd. Insofern ist es vielleicht gut, dass man Checkpoints hat, dass man immer sicher ist, dass man keinen Schritt vergisst“* (Interview 4, Z. 105-108).

Sonstiges

Da das Assistenzsystem zum Zeitpunkt des User-Tests als Prototyp am Modellarbeitsplatz vorlag, bestand noch keine sensorbasierte Prüfung der Montageschritte. Die Probanden empfinden das nötige „weiter“-Drücken nach einem Montageschritt überwiegend als störend:

- *„Dann würde es mich glaub ich irgendwann stören, dass ich ‚weiter‘ drücken muss und dann wieder zurück. Ich glaube das würde schneller gehen, wenn ich nicht immer auf den Bildschirm so tippen müsste.“* (Interview 4, Z. 25-27)
- *„Dass man ständig auf ‚weiter‘ klicken muss [...] kann nervig werden“* (Interview 5, Z. 6-7)
- *„Ich hätt’s irgendwie cool gefunden, wenn’s automatisch weitergeht“* (Interview 10, Z. 21-22)

Das manuelle Weiterschalten wird im betriebsbereiten Assistenzsystem nicht mehr nötig sein.

Damit einhergehend sind teils andere (auditive) Fehlermeldungen gewünscht: *„Dass das System da vielleicht helfen kann, um zu zeigen wo der Fehler vielleicht ist. Oder an den Punkt wieder zurückspulen, wo man quasi wieder weitermachen soll“* (Interview 1, Z. 34-36) oder *„Vielleicht eine sprachliche oder auditive Einschätzung noch, dass man dann auch gesagt bekommt, was man falsch macht oder was man machen soll. Dass man bei der Arbeit nicht*

immer zwischengucken muss und lesen muss, sondern auch dann quasi gesagt bekommt, was man zu machen hat UND halt auch sehen kann, was man machen soll." (Interview 1, Z. 44-47).

Der Proband 7 beschreibt: *"Ich hätte es aber noch gut gefunden, wenn man noch mit den Bauteilen irgendwie noch eine Interaktion hat, dass man genau weiß, dass man auch das richtige Bauteil greift"* (Z. 111-112). Hier wird im betriebsbereiten Assistenzsystem durch Sensoren Hilfe geboten.

3.3.6 Korrelationsanalysen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg

Es werden Korrelationen zwischen den HRV-Parametern während der Montage und der RSME berechnet. Es ergibt sich lediglich zwischen LF-Peak [Hz] und RSME eine signifikante hohe positive Korrelation ($r = 0,756^*$).

4 Diskussion

Hauptziel dieser Promotionsarbeit war die vergleichende Beurteilung digitaler Assistenztechnologien hinsichtlich nutzerbezogener Aspekte in drei arbeitsphysiologischen Teilstudien, die aufeinander aufgebaut waren und eigenständige Hypothesen und Fragestellungen beinhalten.

Im Folgenden werden die ermittelten Forschungsergebnisse aus den drei Teilstudien diskutiert. Dabei werden zunächst die in Unterkapitel 1.3 aufgeführten Arbeitshypothesen zu den Einzelstudien reflektiert und Limitationen der Studien aufgeführt. Die Diskussion wird mit Schlussfolgerungen und einem Ausblick für die Praxis abgeschlossen.

4.1 Reflexion der Arbeitshypothesen

Die Reflexion der Arbeitshypothesen erfolgt für die drei Teilstudien.

4.1.1 Vorstudie

Themenkomplex zur psychophysiologischen Beanspruchung

I-H1: Die objektive physiologische Beanspruchung bei der Arbeit mit der digitalen Liste unterscheidet sich nicht im Vergleich zur Papierliste.

Anhand der Untersuchungen von Wille (2016), der in einer Laborstudie mit 41 Probanden keine Unterschiede in der physiologischen Beanspruchung (ermittelt durch die HR und HRV) zwischen der Tätigkeit mit einem Tablet-PC und mit einem HMD erkennen konnte, sowie Tümler (2009), der in einer Laborstudie, in der 20 Probanden zwei Stunden Kommissionieraufträge bearbeiteten, keine physiologischen Unterschiede zwischen einem AR-HMD und einer Papierliste feststellen konnte, wurde die Hypothese I-H1 aufgestellt. Veröffentlichte Studien zum Vergleich der physiologischen Beanspruchung bei den Arbeiten mit Papierlisten und digitalen Listen existierten in den öffentlich zugänglichen Literaturdatenbanken zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht. Jedoch wurde, durch den identischen Aufbau der Papierliste und der digitalen Liste, in der ersten Teilstudie vermutet, dass keine physiologischen Unterschiede auftreten werden.

Im Vergleich der HRV-Daten, die die Beanspruchungslage objektivieren sollten, zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der Papierliste und der digitalen Liste. In den Auslenkungen der HRV-Daten von der Ruhephase zu den jeweiligen Arbeitsphasen zeigt sich, dass SD2 [ms] sich um 4,7 % bei der Arbeit mit der Papierliste verringert, während sich SD2 [ms] bei der digitalen Liste um 6,3 % erhöht. SDNN [ms] zeigt bei der Papierliste eine tendenzielle Verringerung um 2,2 % und bei der digitalen Liste eine Erhöhung um 5,2 %. Damit

deuten beide Parameter auf eine höhere Beanspruchung bei der Papierliste verglichen mit der digitalen Liste hin. Im LGM zeigt die Hilfestellung einen tendenziellen Einfluss auf HF [%]. Die Beanspruchung erhöht sich demnach tendenziell stärker bei der digitalen Liste als bei der Papierliste. Es zeigen sich zudem große Standardabweichungen in den Differenzen der HRV-Daten und damit eine starke interindividuelle Variabilität. Ursächlich dafür sind unterschiedliche autonome Reaktionen der Probanden.

Insgesamt sind die Auslenkungen prozentual klein und die p-Werte nur tendenziell bzw. knapp signifikant unterschiedlich. Zudem zeigen die weiteren untersuchten HRV-Parameter keine signifikanten Differenzen zwischen den Hilfestellungen. Insgesamt stützen die untersuchten Parameter damit die Hypothese, dass es durch die digitale Liste nicht zu einer erheblichen erhöhten Beanspruchung kommt.

Auf Grundlage der Ergebnisse wird die Hypothese I-H1 damit angenommen.

I-H1a: Die objektive physiologische Beanspruchung ist während der Montageaufgaben höher als in der Ruhephase. Dies gilt für beide Varianten.

Tümler (2009) zeigte in seiner Untersuchung ebenfalls, dass die physiologische Beanspruchung bei der Bearbeitung von Kommissionieraufgaben – unabhängig davon, ob ein AR-Verfahren oder eine Papierliste verwendet wurde – verglichen mit einer Ruhephase höher ist. Daher wurde die Hypothese I-H1a aufgestellt.

In der Vorstudie ist eine tendenziell erhöhte Beanspruchung in den Arbeitsphasen, verglichen mit der Ruhephase, ausschließlich bei HF [%] erkennbar. Eine mögliche Ursache für dieses Ergebnis kann sein, dass die Arbeitsphasen kognitiv nicht ausreichend beanspruchend waren und somit ein Unterschied zur Ruhephase nicht deutlich wird. Aus den Ergebnissen des NASA-TLX ergeben sich jedoch für die Papier- und die digitale Liste Punktwerte knapp unter 60. Nach der Metaanalyse von Grier (2015), die durch Häufigkeitsverteilungen und Maße der zentralen Tendenz das Verständnis von beobachteten NASA-TLX-Werten verbessern sollte, liegen die Werte in der Vorstudie damit sogar über dem Maximalwert der Mechanical Tasks, zu denen auch Montageaufgaben zählen, und im vierten Quartil der Cognitive Tasks. Somit kann das Argument anspruchsloser Aufgaben entkräftet werden. Wahrscheinlicher ist, dass die Probanden vor Beginn des Versuchs aufgeregt waren und damit die Unterschiede zu den Arbeitsphasen nicht signifikant sind. Daher wurden in den folgenden User-Tests zusätzlich Ruhephasen am Ende des Versuchs durchgeführt.

Die Hypothese I-H1a kann daher nur teilweise angenommen werden.

I-H1b: Die objektive physiologische Beanspruchung sinkt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.

Da Wille (2016) im zeitlichen Verlauf der Laboruntersuchungen einen Gewöhnungseffekt und damit eine Verringerung der physiologischen Beanspruchung zeigen konnte und auch Tümler (2009) keine erhöhte Beanspruchung im zeitlichen Verlauf feststellen konnte, wurde die Hypothese I-H1b aufgestellt.

Die Auswertung der HRV-Parameter für die Vorstudie zeigt bei Mean NN [ms], SDNN [ms], Mean HR [1/min], RMSSD [ms], NN 50 [count], pNN 50 [%], VLF [ms²], HF [ms²], TP [ms²], SD1 [ms], SD2 [ms] und DFA1 [ms] signifikante Unterschiede auf, die darauf hindeuten, dass die physiologische Beanspruchung vom ersten zum zweiten Durchlauf abnimmt. Dieses Ergebnis zeigt sich tendenziell auch bei den frequenzbezogenen Parametern LF nu und HF nu. Durch das LGM bestätigt sich ein signifikanter Effekt des Durchlaufs auf Mean NN [ms] und Mean HR [1/min]. Tendenzuell nimmt der Durchlauf ebenfalls Einfluss auf RMSSD [ms].

Die Hypothese I-H1b kann damit bestätigt werden.

I-H2: Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist bei der Arbeit mit der digitalen Liste geringer als bei der Arbeit mit der Papierliste.

Im Vergleich von Papiermedien und digitalen Medien ist davon auszugehen, dass sich diese hinsichtlich der subjektiven und visuellen Beanspruchung unterscheiden. Bächler et al. (2016) konnten in ihrer eineinhalbstündigen Laborstudie mittels NASA-TLX deskriptiv eine höhere subjektive Beanspruchung bei der Arbeit mit einer Papierliste feststellen als bei der Arbeit mit einem Display. Während Bächler et al. (2016) dies bei 24 untersuchten Teilnehmern allerdings nicht sicher statistisch bestätigen konnten, zeichnet sich in einer früheren Crossover-Studie von Tang et al. (2003) eine signifikant höhere subjektive Beanspruchung bei der Arbeit mit einer Papierliste verglichen mit einem LCD-Display ab. Die Autoren untersuchten die subjektive Beanspruchung mittels NASA-TLX bei 75 Probanden, die 45 Minuten Montageaufgaben mit Duplo-Steinen ausführten. Rosenfield (2016) wiederum beschrieb in seinem Übersichtsartikel stärkere subjektiv empfundene visuelle Beanspruchungen wie müde und trockene Augen, sowohl während als auch unmittelbar nach der Betrachtung elektronischer Bildschirme verglichen mit Papiermedien.

In der Vorstudie zeigt sich in den Auslenkungen der Beanspruchungsreaktionen lediglich ein tendenzieller Unterschied in der Beschwerde „Schmerzen in oder um die Augen“. Während sich diese Augenbeschwerde bei der Papierliste um 6,7 % verringert, erhöht sich die Ausprägung der Beschwerde bei der digitalen Liste um 8,3 %. Signifikante Effekte konnten für die

subjektive visuelle Beanspruchung mittels VFQ und der situationsgebundenen Beanspruchungs- und Motivationslage anhand der EZ-Skala jedoch weder durch eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung nach Friedman und einem Post-hoc-Test noch mit dem LGM aufgedeckt werden. Ebenso zeigt der NASA-TLX, dass die Probanden bei der Verwendung beider Hilfestellungen eine ähnliche Beanspruchung erleben. Verglichen mit den Werten von Grier (2015) sind diese Werte jedoch vergleichsweise hoch.

Die Hypothese I-H2 muss abgelehnt werden.

I-H2a: Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist nach den Montageaufgaben höher als vor dem Versuch. Dies gilt für beide Varianten.

Verschiedene Studien zu den Auswirkungen von AR-Systemen auf den Menschen bestätigen, dass die Motivations- und Beanspruchungslage zu Beginn einer Studie besser ist als nach Versuchsdurchführung (Tümler et al. 2008a; Tümler et al. 2008b; Tümler 2009; Schega et al. 2011). Dabei existieren jedoch keine Unterschiede hinsichtlich des verwendeten Systems (z. B. Papierlisten, HMDs), sodass die Hypothese I-H2a aufgestellt wurde.

Auch aus der durchgeführten Vorstudie geht hervor, dass die Aktivierung und Anstrengungsbereitschaft vor dem Versuch signifikant höher sind als nach dem Durchlauf mit der Papierliste. Ebenso zeigt sich, dass die Kontaktbereitschaft vor dem Versuch tendenziell höher ist als nach der Montage mit der digitalen Liste. Unterschiede in der subjektiven visuellen Beanspruchung können durch den VFQ in der Vorstudie nicht nachgewiesen werden.

Die Hypothese I-H2a kann damit teilweise bestätigt werden.

I-H2b: Die subjektive (visuelle) Beanspruchung steigt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.

Wille et al. (2014) konnten in ihrem Versuch, bei dem 20 Probanden ein Spielzeugauto montieren mussten, während sie ein virtuelles Messgerät überwachten, mittels VFQ und RSME einen Anstieg der subjektiven visuellen Beanspruchung und erlebten geistigen Anstrengung im zeitlichen Verlauf ermitteln, unabhängig davon, ob ein Tablet-PC oder ein HMD verwendet wurde. Die Autoren bemerkten jedoch, dass sich die visuelle Beanspruchung mit einem Maximum von 3 beim VFQ auf einem sehr geringen Niveau bewegt.

In der Vorstudie können in der subjektiven visuellen Beanspruchung durch den VFQ keine signifikanten Veränderungen im zeitlichen Verlauf aufgedeckt werden. Wie bei Wille et al. (2014) bewegen sich die VFQ-Werte auf einem niedrigen Level. Erkennbar ist jedoch, dass die Aktivierung im Vergleich der Messung vor dem Versuch und nach dem zweiten Durchlauf tendenziell sinkt. Ebenso sinkt tendenziell die Anstrengungsbereitschaft sowohl im ersten als

auch nochmals im zweiten Durchlauf. Der Durchlauf scheint zudem Einfluss auf die Spannungslage zu haben, wie sich im LGM zeigt. Die Auswertung des NASA-TLX bestätigt, dass die erlebte Beanspruchung im zweiten Durchlauf signifikant kleiner ist als im ersten Durchlauf. Die Ergebnisse können die Beobachtungen von Wille et al. (2014) nicht bestätigen, erscheinen im Sinne der Anpassung und Gewöhnung an die Arbeitsaufgabe jedoch schlüssig. Die Unterschiede können damit zusammenhängen, dass die Probanden der Untersuchung von Wille et al. (2014) an einem vierstündigen Versuch teilnahmen, während die Testdauer in der Vorstudie bei zweimal je 30 Minuten lag.

Die Hypothese I-H2b muss abgelehnt werden.

Themenkomplex zur objektiven Leistung

I-H3: Die objektiven Leistungsdaten sind bei der Arbeit mit der digitalen Liste besser als bei der Arbeit mit der Papierliste.

Die bisherige Forschungslandschaft liefert widersprüchliche Ergebnisse, ob bei Papierlisten oder digitalen Listen in der Montage eine bessere objektive Leistung zu erwarten ist. Einerseits zeigten Tang et al. (2003) in einem 45-minütigen Montageversuch mit 75 Probanden weniger Fehler mit einer Papierinstruktion als mit einer computergestützten Anleitung durch einen LCD-Display. Ebenso zeigten Bächler et al. (2016), dass mit einem Display langsamer verpackt wurde und mehr Fehler gemacht wurden als mit einer Papierliste. Die Unterschiede waren jedoch bei beiden Studien statistisch nicht unterschiedlich. Andererseits zeigte das Experiment von Tang et al. (2003), dass Montageaufgaben mit einer Papierliste rein deskriptiv langsamer bearbeitet wurden als mit einer digitalen Anleitung. 24 Probanden, die Schuh et al. (2017) untersuchten, waren bei der Montage eines Stiftehalters mit einer digitalen Liste produktiver und zeigten bessere Qualitätsergebnisse als mit einer Papierliste. Eine frühere Metaanalyse von Höffler & Leutner (2007) untermauerte dies. Die Autoren kamen nach der Analyse von 26 Primärstudien zu dem Schluss, dass es einen „*substantial overall advantage of animation over static pictures*“ (Höffler & Leutner 2007, S. 735) gibt. Dies ist mit papierbasierten Instruktionen jedoch nicht möglich. Zudem scheint die Art der Gestaltung von digitalen Anzeigen und Animationen eine wichtige Rolle für die Effektivität zu spielen (Michas & Berry 2000).

Die Ergebnisse aus der Vorstudie zeigen allerdings keinerlei signifikante Unterschiede in den Daten des Augenbewegungstests zwischen der Papier- und der digitalen Variante.

Die Hypothese I-H3 muss daher abgelehnt werden.

I-H3a: Die objektiven Leistungsdaten sind bei den Montageaufgaben besser als vor dem Versuch. Dies gilt für beide Varianten.

Auf der einen Seite könnte nicht nur bei körperlicher, sondern auch bei geistiger Arbeit und mentaler Beanspruchung davon ausgegangen werden, dass bei gleichbleibenden Arbeitsaufgaben die Leistung mit der Zeit abfällt, da die Ermüdung zunimmt (Hohmann et al. 2007; Zintl & Eisenhut 2009). Auf der anderen Seite zeigen Fjeld et al. (2002), Tang et al. (2003) und Schuh et al. (2017) in ihren Laboruntersuchungen, die Ähnlichkeiten zur Vorstudie aufweisen, eher Lerneffekte. Durch den ähnlichen Versuchsaufbau wird daher davon ausgegangen, dass sich die objektiven Leistungsdaten im Vergleich der Messung vor dem Versuch zu einem nachfolgenden TAP-Test verbessern.

Für die Bedingung Gap in der Mitte des Gesichtsfeldes ist zu erkennen, dass die Reaktionszeiten (Mittelwert sowie Median) im TAP-Test vor den Arbeitsphasen jeweils länger waren als nach der Arbeitsphase mit der Papierliste bzw. mit der digitalen Liste. Es deutet sich somit eher ein Übungseffekt bzw. Lerneffekt als eine Ermüdung an. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass bei einer häufigeren Durchführung des Tests bzw. längeren Dauer des Versuchs ein Ermüdungseffekt eintritt. Unter den weiteren Bedingungen des Augenbewegungstests sind keine Unterschiede in den Reaktionszeiten erkennbar. Ebenso ergeben sich keine signifikanten Effekte bei den Fehlern, Auslassungen und Ausreißern. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Betrachtung der Fehlerrate tendenziell wichtiger als die Durchführungszeit, weil Fehler im Produktionsverlauf mehr Kosten verursachen als längere Ausführungszeiten (Bächler et al. 2016).

Die Hypothese I-H3a kann daher nur teilweise bestätigt werden.

I-H3b: Die objektiven Leistungsdaten verbessern sich im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.

Wie unter I-H3a bereits beschrieben, konnten unter anderem Fjeld et al. (2002), Tang et al. (2003) und Schuh et al. (2017) in ihren Laborstudien zeigen, dass sich bei mehreren Durchgängen die objektiven Leistungsdaten wie benötigte Zeit und Fehlerzahlen verbessern, unabhängig davon, welches System zur Aufgabenerledigung verwendet wurde. Es ist daher anzunehmen, dass ein Lerneffekt im zeitlichen Verlauf der Vorstudie eintritt. Bestätigt wird dies für die Bedingung Gap Mitte durch eine Verbesserung der Reaktionszeit (Mittelwert und Median) im zeitlichen Verlauf. Auch die Reaktionszeit (Median) in der Bedingung Overlap links verringert sich signifikant vom ersten zum zweiten Durchlauf. Der Durchlauf bewirkt zudem einen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der Auslassungen, die sich tendenziell verringern. Bei Fehlern und Ausreißern kann jedoch keine signifikante Veränderung entdeckt werden.

Die Hypothese I-H3b kann damit teilweise bestätigt werden.

Themenkomplex zur Usability

I-H4: Die Gebrauchstauglichkeit wird bei der digitalen Liste ähnlich eingeschätzt wie bei der Papierliste.

Bannat (2014) leitete 16 Probanden im Alter von 18 bis 25 Jahren an, zwei Montageaufgaben (Crash-Bobby und Fischertechnik-Auto) jeweils mittels einer Papierliste und eines digitalen Montageablaufplans, der auf einem Monitor präsentiert wurde, zu erledigen. Mithilfe eines eigen erstellten Fragebogens aus einer Abwandlung der SUS zeigte sich, dass die Probanden die digitale Liste leicht bevorzugten. Eine statistische Auswertung wurde jedoch nicht vorgenommen. Da bei Bannat (2014) kein gesicherter statistischer Unterschied zwischen den zwei Varianten erkennbar war und die Papierliste und die digitale Liste in der Vorstudie grundsätzlich identisch aufgebaut und visualisiert waren, wird in der Hypothese I-H4 angenommen, dass die Gebrauchstauglichkeit beider Hilfestellungen in der Vorstudie durch die Probanden ähnlich eingeschätzt wird.

In den Ergebnissen zeigt sich, dass 46 % der untersuchten Probanden zukünftig lieber mit der digitalen Liste arbeiten würden, während 33 % die Papierliste vorziehen würden. Wie bei Bannat (2014) wird in der Vorstudie eine Tendenz zur digitalen Liste sichtbar, allerdings kann auch in der Vorstudie kein signifikanter Unterschied in der Favoritenauswahl durch die SUS festgestellt werden. Die Usability beider Varianten ist nach Bangor et al. (2009) als okay bis gut zu bewerten. Es scheint hingegen so, als würden die Probanden eher die Hilfestellung vorziehen, mit der sie im zweiten Durchlauf gearbeitet haben. Möglicherweise bewerten die Probanden die Usability im zweiten Durchlauf – unabhängig von der verwendeten Hilfestellung – besser, da sie sich an die Arbeitsaufgabe gewöhnt haben.

Die Hypothese I-H4 kann angenommen werden.

Themenkomplex zu Korrelationsverbindungen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg

I-H5: Es finden sich Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Ebenen des modifizierten psychophysiologischen Ansatzes nach Fahrenberg (1969).

Die Beantwortung der Hypothese erfolgt anhand der folgenden Nebenhypothesen.

I-H5a: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven (visuellen) Beanspruchung bei der jeweiligen Variante.

Auf Grundlage diverser Studien wird angenommen, dass sich Zusammenhänge zwischen der subjektiv empfundenen und objektiv ermittelten physiologischen Beanspruchung für die durchgeführte Vorstudie finden lassen. Lin et al. (2005) ließen 18 Probanden verschiedene Aufgaben in einem Videospiel erledigen. Sie ermittelten die physiologische Beanspruchung mittels

elektrodermalen Aktivität, Blutvolumenpuls und Herzschlagfrequenz und die subjektive Beanspruchung mittels RSME. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass sich die physiologischen Daten in den subjektiven Berichten zur Bewertung des Stressniveaus widerspiegeln. Tümler et al. (2008a) konnten bei einer vergleichenden Untersuchung eines AR-HMDs und einer Papierliste zeigen, dass die subjektiven Beanspruchungen (erhoben mittels EZ-Skala und Befindlichkeitsskala) den objektiven Messungen mittels HRV entsprachen und die Werte miteinander korrelierten. Es wurde deutlich, dass die Arbeit mit dem AR-System im Vergleich zur Arbeit mit der Papierliste nicht zu einer signifikant höheren Gesamtbeanspruchung oder einem negativ veränderten Motivationsniveau führte. Roggentin (2009) konnte ebenfalls zeigen, dass die Binärfaktoren der EZ-Skala vielfach mit den HRV-Parametern assoziiert sind. Auch zwischen dem NASA-TLX und den HRV-Parametern RMSSD, LF, HF und LF/HF konnten bereits Zusammenhänge erkannt werden (Shakouri et al. 2018). Wulvik et al. (2020) zeigten im Kontext eines Schiffbrückensimulators (31 Probanden navigierten Schiffe in zwei unterschiedlichen Szenarien), dass Elemente des psychischen Zustands mit Änderungen des physiologischen Zustands korrelierten. Am deutlichsten korrelierten in diesem Szenario Stress und Arbeitsbelastung mit der elektrodermalen Aktivität und Elementen der Herzfrequenzvariabilität.

Es existieren auch Untersuchungsergebnisse, die keine Zusammenhänge zwischen subjektiven und objektiven Beanspruchungen nachweisen konnten. Jeschke et al. (2016) erhoben in einer Laborstudie mit 30 Probanden, die dual-2-back-Aufgaben bearbeiteten, u. a. die subjektive Beanspruchung mittels RSME und die objektive Beanspruchung mittels HR, HRV und okulomotorischen Reaktionen der Pupillengröße und konnten keine signifikanten Korrelationen entdecken. Dass die Ergebnisse objektiver und subjektiver Beanspruchung teilweise gegensätzlich sind, ist ebenfalls möglich. Stockinger et al. (2020) zeigten in einem vergleichenden Laborexperiment, bei dem mit einem Pick-by-Light und einem Pick-by-Paper kommissioniert wurde, dass die Herzschlagfrequenz bei der Arbeit mit dem Pick-by-Light höher war, während die subjektive Beanspruchung, durch den NASA-TLX ermittelt, bei dem Pick-by-Paper höher war. Auch Abele & Kluth (2020) konnten Diskrepanzen zwischen objektiven und subjektiven Daten aufzeigen. Letztendlich sind Unterschiede und sich nicht deckende Ergebnisse in der physiologischen und subjektiven Beanspruchung nachvollziehbar, denn *„während die objektiven Beanspruchungsparameter direkt die Beanspruchung aus körperlichen Reaktionen [...] [ableiten], unterliegen die subjektiven Beanspruchungsparameter moderierenden Variablen der Introspektion“* (Wille 2016, S. 45).

Für die Ermittlung der subjektiven (visuellen) Beanspruchung wurden in der Vorstudie der NASA-TLX, die EZ-Skala und der VFQ eingesetzt. Als physiologisches Maß diente die HRV.

Zwischen dem NASA-TLX und dem HRV-Parameter HF [ms²] zeigt sich bei der Anwendung der digitalen Liste ein schwacher negativer Zusammenhang. Eine verringerte parasympathischen Aktivität bei HF [ms²], die auf eine erhöhte physiologische Beanspruchung hindeutet, geht mit einer erhöhten subjektiven Beanspruchung, operationalisiert durch den NASA-TLX, einher. Bei der Papierliste zeigt sich dieser Zusammenhang nicht.

Bei den VFQ-Beschwerden erscheint das Item „Kopfschmerzen“ interessant. Hier zeigen sich, sowohl bei der Anwendung der Papierliste als auch bei digitalen Liste, geringe positive Zusammenhänge zu HF [%] und HF nu, sowie geringe negative Zusammenhänge zu LF nu und LF/HF.

Sowohl bei der Papierliste als auch bei der digitalen Liste lassen sich einige Zusammenhänge zwischen den Binärfaktoren der EZ-Skala und den HRV-Parametern erkennen. Für die Papierliste ergeben sich einige geringe bis mittlere positive signifikante Zusammenhänge zwischen SDNN [ms], VLF [ms²], TP [ms²] und SD2 [ms] zu den Binärfaktoren. Diese sprechen dafür, dass eine hohe Ausprägung der Faktoren Motivation, Beanspruchung, Aktivierung, Effizienz, Tension, Anstrengungsbereitschaft, Selbstsicherheit und Stimmungslage mit einer geringen physiologischen Beanspruchung assoziiert ist. Zudem ist bei steigender Effizienz eine sinkende mittlere Herzschlagfrequenz und damit eine geringere Beanspruchung zu erkennen. Die statistische Analyse zeigt ebenfalls, dass eine geringere Herzschlagfrequenz mit einer hohen Selbstsicherheit in Verbindung steht. Bei der digitalen Liste ergeben sich – außer für Mean HR [1/min] – geringe bis mittlere positive Zusammenhänge insbesondere zwischen dem Binärfaktoren Tension (nach Nitsch (1976) auch „emotionale Spannungslage“) auf der zweiten Analyseebene und dem Binärfaktor Spannungslage (nach Nitsch (1976) auch Selbstkontrolle) auf der dritten Analyseebene. Sie deuten darauf hin, dass sich bei einer steigenden Tension und Spannungslage die physiologische Beanspruchung verringert. Damit scheint die Arbeitsaufgabe für die Probanden – unter Berücksichtigung der zeitlichen Dauer der Arbeitsphasen – eher einer positiven Beanspruchung im Sinne einer Aktivierung darzustellen, als eine negative Beanspruchung im Sinne der Ermüdung. Abschließend lässt sich zur Hypothese zusammenfassen, dass einige Zusammenhänge zwischen den HRV-Parametern und Einzelfaktoren der subjektiven (visuellen) Beanspruchung (z. B. Kopfschmerzen, Tension und Spannungslage) gefunden werden konnten.

Die Hypothese I-H5a kann damit teilweise angenommen werden.

I-H5b: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.

In einer Studie von Lin et al. (2005) wurden Hinweise darauf gefunden, dass physiologische Daten mit der Aufgabenleistung korrelieren. Roggentin (2009) fand in ihren Untersuchungen

ebenfalls Zusammenhänge zwischen der Arbeitsgeschwindigkeit und den Herzfrequenzdifferenzen. Auch Rieder et al. (2017) zeigten in einem Fallstudienvergleich zweier 3D-Interaktionstechniken, dass Herzschlagfrequenz, Hautleitwert und der HRV-Parameter pNN 50 die Aufgabenleistung des Benutzers während des Interaktionsprozesses mit VR-Techniken widerspiegeln. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass trotz dieser Zusammenhänge physiologische Messungen nicht als Ersatz für Evaluationen hinsichtlich Aufgabenleistung und Usability betrachtet werden können. Sie seien dennoch ein Werkzeug zur besseren Interpretation dieser Faktoren. Jeschke et al. (2016) hingegen konnten keine Zusammenhänge zwischen objektiver physiologischer Beanspruchung und objektiven Leistungsparametern nachweisen.

Für die Papierliste können geringe bis mittlere negative Zusammenhänge zwischen der Reaktionszeit und Mean NN [ms] gefunden werden, sowie geringe bis mittlere positive Zusammenhänge zwischen der Reaktionszeit und Mean HR [1/min]. Dies spricht bei einer höheren Reaktionszeit für eine höhere physiologische Beanspruchung. Signifikante Zusammenhänge zeigen sich bei der Reaktionszeit, jedoch nicht bei Fehlern, Auslassungen und Ausreißern. Bei der Arbeit mit der digitalen Variante zeigen sich keinerlei deutliche Zusammenhänge.

Die Hypothese I-H5b kann damit nur teilweise bestätigt werden.

I-H5c: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.

Die Studienlage hinsichtlich der Zusammenhänge von subjektiver Beanspruchung und objektiver Leistung ist uneinheitlich. Während Moise (2006) zeigen konnte, dass der NASA-TLX stark mit dem Aufgabenerfolg korreliert und ebenso eine aktuellere Untersuchung von Arsintescu et al. (2019) Zusammenhänge zwischen dem NASA-TLX und einer psychomotorischen Vigilanzaufgabe bei 90 Piloten, die an insgesamt 20 Tagen 2.762 Kurzstreckenflüge absolvierten, aufdecken konnte, wies Jeschke et al. (2016) keine Zusammenhänge zwischen subjektiver Beanspruchung und objektiven Leistungsparametern nach.

Zwischen den subjektiven Beanspruchungsparametern und den Reaktionszeiten, Fehlern und Auslassungen können für die digitale Variante keine und für die Papierliste in der Vorstudie kaum Zusammenhänge gefunden werden. Es stechen jedoch geringe bis mittlere negative signifikante Korrelationen zwischen der Anzahl der Ausreißer und den Binärfaktoren der EZ-Skala hervor. Je höher die Beanspruchung, Effizienz, Tension, Soziale Anerkennung, Stimmungslage, Erholtheit bei der Arbeit mit der Papierliste ist, desto geringer ist die Zahl der Ausreißer. Je höher die Motivation, Beanspruchung, Aktivierung, Tension, Anstrengungsbereitschaft, Kontaktbereitschaft, Selbstsicherheit, Stimmungslage und Spannungslage bei der digitalen Liste ist, desto geringer ist die Zahl der Ausreißer.

Die Hypothese I-H5c kann damit teilweise für die Zusammenhänge zwischen der situationsgebundenen Motivations- und Beanspruchungslage und den objektiven Leistungsdaten bestätigt werden.

I-H5d: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit bei der jeweiligen Variante.

Zu Beginn des Projektes und den durchgeführten Recherchen fehlten Studien zum Zusammenhang der objektiven physiologischen Beanspruchung und der Usability. Es wurde jedoch angenommen, dass eine als gut empfundene Gebrauchstauglichkeit mit einer geringeren physiologischen Beanspruchung assoziiert sein kann. Aufgrund dessen wurde die Hypothese I-H5d aufgestellt.

Die vorausgesagten Zusammenhänge können für die Papierliste nicht gefunden werden, jedoch zeigen sich bei der Montage mit der digitalen Liste geringe positive Zusammenhänge zwischen der SUS und den HRV-Parametern RMSSD [ms], NN 50 [count], pNN 50 [%], HF [ms²] und SD1 [ms]. Diesbezüglich ermittelte Korrelationen legen nahe, dass eine gute Gebrauchstauglichkeit mit einer geringeren physiologischen Beanspruchung assoziiert ist.

Die Hypothese I-H5d kann somit teilweise bestätigt werden.

I-H5e: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit bei der jeweiligen Variante.

Es existieren einige Forschungsergebnisse zu den Zusammenhängen der subjektiven Beanspruchung und der Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit. Heponiemi et al. (2017) zeigten in einer Längsschnittstudie mit drei Erhebungswellen und einer Stichprobe von 1.095 Ärzten einen Zusammenhang zwischen unausgereiften, zeitaufwendigen, wenig gebrauchstauglichen Informationssystemen und dem steigenden Stressempfinden der Mediziner. Auch Mazur et al. (2019) untersuchten u. a. Zusammenhänge zwischen der erlebten Gebrauchstauglichkeit eines elektronischen Patientendatensystems und der subjektiven Beanspruchung bei 20 Ärzten. Ihre Ergebnisse legten ebenfalls nahe, dass eine Verbesserung der Usability von elektronischen Gesundheitsakten mit einer geringeren subjektiven Beanspruchung verbunden ist. Kretschmer & Terharen (2019) testeten mit 30 Probanden ein VR-Training für die Intralogistik als Serious Game, einer spielerischen Lernmethode zur digitalen Wissensvermittlung, und konnten signifikante negative Zusammenhänge zwischen der subjektiven Beanspruchung (mittels NASA-TLX) und der Usability (mittels SUS) ermitteln. Es gibt jedoch auch inkongruente Ergebnisse. Longo & Dondio (2015) und Longo (2018) konnten keine eindeutigen Beweise für die Interaktion von SUS und NASA-TLX finden. Die Autoren merkten an, dass die SUS und der NASA-TLX zwei verschiedene Aspekte der Mensch-System-Interaktion messen.

Beide Instrumente könnten daher gemeinsam eingesetzt werden, um die Benutzererfahrung besser zu beschreiben.

Bei der Arbeit mit der Papierliste werden geringe bis mittlere negative Zusammenhänge zwischen der Usability und den visuellen Beschwerden „Tränende Augen“, „Schwere Augen“ und „Schwierigkeiten scharf zu sehen“ sichtbar. Je besser die Usability eingeschätzt wird, desto geringer scheinen die subjektiven visuellen Beschwerden ausgeprägt zu sein. Zusammenhänge zwischen der SUS und dem VFQ sind jedoch nur für die Papierliste und nicht für die digitale Liste erkennbar. Weiterhin zeigt sich bei beiden Varianten bei einer guten Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit eine höhere Spannungslage. Bei der digitalen Liste wird zudem deutlich, dass eine hohe Tension und Kontaktbereitschaft mit einer guten Usability zusammenhängt. Bei der digitalen Liste zeigt sich – zwischen der SUS und dem NASA-TLX – außerdem, dass eine hohe Usability mit einer geringen subjektiven Beanspruchung zusammenhängt.

Die Hypothese I-H5e kann damit bestätigt werden.

I-H5f: Es finden sich Zusammenhänge zwischen den objektiven Leistungsdaten und der Gebrauchstauglichkeit bei der jeweiligen Variante.

Es liegen verschiedene Studien vor, die die Zusammenhänge zwischen objektiven Leistungsdaten und der Gebrauchstauglichkeit von Systemen untersuchen. Bereits 1994 kamen Nielsen & Levy in ihrer Metaanalyse zu dem Schluss, dass Nutzer die Systeme bevorzugten, mit denen sie auch die beste Leistung erzielten. Mehr als zehn Jahre später führten Hornbæk & Law (2007) eine Metaanalyse unter Einbeziehung von 73 Studien durch, in der sie geringe positive Zusammenhänge zwischen den Usability-Dimensionen Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit aufzeigen konnten. Nach der in Abschnitt 1.2.5 aufgeführten Definition wird die Ebene der Effektivität in der Vorstudie durch die objektiven Leistungsdaten und die Ebene der Zufriedenstellung durch die Ermittlung der Usability mittels SUS abgedeckt. Karapanos et al. (2018) zeigten in ihrer quantitativen Feldstudie mittlere positive Zusammenhänge zwischen der Usability (SUS) und den Ergebnissen einer webbasierten Lerneinheit für 31 Schüler eines gymnasialen Biologieleistungskurses. Die bei Hypothese I-H5e beschriebene Interventionsstudie von Mazur et al. (2019) fand nicht nur Hinweise darauf, dass ein benutzerfreundliches System mit einer geringeren subjektiven Beanspruchung, sondern auch mit einer besseren Leistung verbunden ist. Robelski (2016) zeigte, dass sich eine ergonomische Gestaltung der Benutzerschnittstellen (v. a. funktionale und redundante Informationsdarstellung und die Anwendung der Gestaltungsprinzipien) positiv auf die Leistung auswirkt. Zudem wirken sich Eigenschaften des Systems (z. B. Zuverlässigkeit) auf die Leistung der Nutzer aus. Andererseits zeigten

Frøkjær et al. (2000), dass die Usability-Ebenen unabhängig voneinander erhoben werden sollten. Es sei nicht davon auszugehen, dass die Konzepte sich überschneiden.

Bei der Vorstudie zeigt sich lediglich bei der Arbeit mit der digitalen Liste ein signifikanter negativer Zusammenhang zwischen der Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit und der Anzahl der Ausreißer. Demnach ist eine gute Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit mit einer geringeren Anzahl von Ausreißern verbunden.

Die Hypothese I-H5f kann damit nur teilweise angenommen werden.

I-H5g: Es finden sich Zusammenhänge zwischen den verschiedenen subjektiven (visuellen) Beanspruchungsparametern bei der jeweiligen Variante.

Tümler (2009) konnte in seiner Untersuchung zur Beanspruchung beim Langzeiteinsatz von AR-Technologien zeigen, dass die EZ-Skala und die Befindlichkeitsskala (Zerssen & Koeller 1976) als Instrumente zur Ermittlung der subjektiven Beanspruchung miteinander korrelierten. Aufgrund dessen wurde die Hypothese I-H5g aufgestellt. In den Korrelationen zur Vorstudie zeigen sich zwischen dem NASA-TLX und der EZ-Skala sowie zwischen dem NASA-TLX und dem VFQ keine signifikanten Zusammenhänge. Erkennbar sind aber einige negative geringe bis mittlere Korrelationen zwischen den visuellen Beschwerden und den Binärfaktoren der Motivations- und Beanspruchungslage. Sie geben Hinweise darauf, dass stärker empfundene Kopfschmerzen bei der Arbeit mit der Papierliste mit einer geringeren Beanspruchung, Defizienz, Anstrengungsbereitschaft, Erholtheit und Schläfrigkeit assoziiert sind. Ähnliche Zusammenhänge deuten sich auch bei der Verwendung der digitalen Liste zwischen Kopfschmerzen und Defizienz, sozialer Anerkennung, Erholtheit und Schläfrigkeit an.

Die Hypothese I-H5g kann damit teilweise angenommen werden.

4.1.2 User-Test (VR)

Themenkomplex zur psychophysiologischen Beanspruchung

II-H1: Die objektive physiologische Beanspruchung bei der Arbeit mit den AR-Konturen unterscheidet sich nicht im Vergleich zum Pick-to-Light-System.

Veröffentlichte Studien zum Vergleich der physiologischen Beanspruchung bei Arbeiten mit AR-Konturen und einem Pick-to-Light-System existierten in den öffentlich zugänglichen Literaturdatenbanken zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht. Aufgrund der Studien von Tümler (2009) und Wille (2016) und den Erkenntnissen aus der Vorstudie wurde angenommen, dass keine Unterschiede in der physiologischen Beanspruchung zwischen den zwei Varianten existieren.

Da die Montage eines Wegeventils bei vielen Probanden weniger als fünf Minuten dauerte, wurden in der HRV-Analyse zur Wegeventilmontage ausschließlich zeitbezogene Parameter für eine Minute betrachtet. Das Wegeventil wurde mit beiden Varianten zweimal montiert, jeweils vor der Puzzleaufgabe sowie nach der Puzzleaufgabe. Bei beiden Durchgängen konnte zwischen den Varianten kein Unterschied in den zeitbezogenen Parametern und damit der physiologischen Beanspruchung entdeckt werden. Bei der Betrachtung des gesamten Montagevorgangs (Wegeventil, Puzzle, Wegeventil pro Variante) konnte ein fünfminütiges Zeitfenster betrachtet und damit zusätzlich frequenzbezogene und nicht-lineare Parameter analysiert werden. Hier ergeben sich bei LF/HF signifikant niedrigere Werte bei dem Pick-to-Light-System, die auf eine geringere Beanspruchung hindeuten. Ebenso ist HF nu bei dem Pick-to-Light-System tendenziell höher und spricht ebenso für eine geringere Beanspruchung im Vergleich zu den AR-Konturen. Die Auswertung der prozentualen Veränderungen der HRV-Parameter zeigt, dass sich HF nu bei beiden Varianten verglichen mit der Ruhephase erhöht. Die prozentuale Auslenkung ist jedoch bei dem Pick-to-Light-System signifikant höher als bei den AR-Konturen. Das LGM bestätigt den signifikanten Einfluss der Variante auf HF nu. Durch HF nu kann damit eine signifikant geringere Beanspruchung beim Pick-to-Light System vermutet werden.

Die Hypothese II-H1 muss daher abgelehnt werden.

II-H1a: Die objektive physiologische Beanspruchung ist während der Montageaufgaben höher als in der Ruhephase. Dies gilt für beide Varianten.

Aufgrund der Ergebnisse von Tümler (2009) und der durchgeführten Vorstudie wurde auch für den User-Test (VR) eine erhöhte Beanspruchung in den Arbeitsphasen – unabhängig von der verwendeten Assistenz – verglichen mit der Ruhephase angenommen.

Durch die Erkenntnisse aus der Vorstudie wurden nicht nur Ruhephasen zu Beginn (einmal mit und einmal ohne VR-Brille), sondern auch am Ende des Versuchs durchgeführt. Wie in der Vorstudie zeigen sich teilweise höhere Beanspruchungen in den Ruhephasen zu Beginn, was durch die Anspannung bzw. Aufregung der Probanden, z. B. weil sie das erste Mal mit einer VR-Brille arbeiten oder sehr ehrgeizig sind, erklärbar ist. Der Vergleich der Ruhephasen ergab, dass die Ruhephase am Ende am ehesten tatsächlich eine Ruhe- bzw. Erholungsphase darstellt. Deshalb wurde dieses Ruheintervall als Vergleichswert für die Berechnungen herangezogen.

Die HRV-Parameter zeigen ein zweideutiges Ergebnis: SDNN [ms], SD HR [1/min], SD2 [ms] und DFA 1 deuten auf eine geringere Beanspruchung in der Ruhephase hin, während Mean NN [ms], Mean HR [1/min] und HF [%] auf eine höhere Beanspruchung in der Ruhephase hindeuten. Möglicherweise sind die Probanden in der Ruhephase am Ende weiterhin aufgeregt

bzw. fühlen sich beobachtet, da während dieses Zeitintervalls die Versuchsleitung im Raum anwesend war. Die mögliche Kritik, dass eine erhöhte Beanspruchung in den Arbeitsphasen durch das alleinige Tragen der VR-Brille hervorgerufen wurde, kann dadurch entkräftet werden, dass der Vergleich der Ruhephasen vorher mit und ohne VR-Brille gezeigt hat, dass keine signifikant erhöhte Beanspruchung allein aufgrund des Tragens der VR-Brille hervorgerufen wird (vgl. auch Hypothese II-H1d).

Es scheinen Unterschiede in der objektiven physiologischen Beanspruchung zwischen der Ruhephase und den Arbeitsphasen zu existieren, die Wirkungsrichtung im Sinne der Beanspruchung ist jedoch nicht klar beurteilbar. Es bleibt zu vermuten, dass die Gestaltung der Ruhephase (z. B. Zeitpunkt, Umgebung) einen maßgeblichen Einfluss auf die HRV-Parameter in diesem Zeitintervall hat.

Die Hypothese II-H1a kann daher teilweise bestätigt werden.

II-H1b: Die objektive physiologische Beanspruchung sinkt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.

Die Ergebnisse der Vorstudie und die vorliegenden Studienergebnisse (Tümler 2009; Wille 2016) deuten auf eine Verringerung der physiologischen Beanspruchung im zeitlichen Verlauf hin.

Im Vergleich des Wegeventils vor dem Puzzle und des Wegeventils nach dem Puzzle zeigen sich bei dem Pick-to-Light-System keine Unterschiede. Bei den AR-Konturen deuten NN 50 [count] und pNN 50 [%] auf eine signifikant höhere Beanspruchung bei dem Wegeventil nach dem Puzzle hin. Dies widerspricht der aufgestellten Hypothese II-H1b. Bei der Betrachtung der 5-Minuten-Intervalle des ersten und zweiten Durchlaufs zeigt sich eine signifikant höhere Beanspruchung im ersten Durchlauf durch Mean NN [ms], Mean HR [1/min], HF [%], LF [%] und tendenziell auch durch LF/HF. Auch LF-Peak [Hz] deutet auf eine höhere Anstrengungskomponente im ersten Durchlauf hin. Ein signifikanter bzw. tendenzieller Einfluss des Durchlaufs wird durch das LGM bei Mean NN [ms], Mean HR [1/min], SD HR [1/min], LF-Peak [Hz] und LF [%] bestätigt. Ein deutlicherer Effekt zeigt sich demnach bei der Betrachtung der 5-Minuten-Intervalle.

Die Hypothese II-H1b kann damit angenommen werden.

II-H1c: Die objektive physiologische Beanspruchung unterscheidet sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.

Nach Kenntnisstand der Autorin liegen keine Erkenntnisse zur psychophysiologischen Beanspruchung im Vergleich der Trainingsarten Video und Desktoptraining vor. Daher wurde eine Nullhypothese formuliert. Es ist jedoch möglich, dass im Sinne der interaktiven Lernweise bei

der Gruppe, die das Desktoptraining absolvierte, eher eine Habituation (Luczak & Rohmert 1976) erreicht worden sein könnte und damit auch eine höhere Herzfrequenzvariabilität und geringere Beanspruchung nachvollziehbar erscheint.

Mithilfe des Mann-Whitney-U-Test werden in Teilen signifikante Unterschiede deutlich (LF-Peak [Hz], LF [%], HF [%] sowie DFA1), die eine höhere kardiophysiologische Beanspruchung während der Montage bei der Trainingsfilm-Gruppe vermuten lassen, jedoch kann dies durch das LGM nicht bestätigt werden.

Die Hypothese II-H1c kann damit angenommen werden.

II-H1d: Das alleinige Tragen der VR-Brille ruft eine höhere objektive physiologische Beanspruchung hervor.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung lagen keine Studienergebnisse vor, aus denen Erkenntnisse zur physiologischen Beanspruchung beim Tragen von VR-Brillen mittels HRV ableitbar waren. Theis et al. (2016) konnten dennoch zeigen, dass beim mehrstündigen Tragen von HMDs eine leicht erhöhte Aktivität der Nackenmuskulatur zu erkennen war. Daher wurde die Hypothese aufgestellt, dass das alleinige Tragen der VR-Brille eine erhöhte objektive physiologische Beanspruchung hervorruft.

In der HRV-Analyse zeigt sich jedoch – wie bereits bei der Diskussion der Hypothese II-H1a besprochen – keine erhöhte physiologische Beanspruchung durch das alleinige Tragen der VR-Brille im Vergleich zu der Ruhephase vor dem Versuch ohne VR-Brille und der Ruhephase vor dem Versuch mit VR-Brille. Jedoch bezieht sich diese Aussage auf ein sehr kurzes Zeitfenster von fünf Minuten. Die Aussagekraft an dieser Stelle ist daher als gering einzuschätzen, insbesondere im Vergleich zu der mehrstündigen Untersuchung von Theis et al. (2016).

Die Hypothese II-H1d muss für den virtuellen User-Test abgelehnt werden.

II-H2: Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist bei der Arbeit mit den AR-Konturen geringer als bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System.

Einige Untersuchungen zeigten einen geringeren Workload mit dem HMD, bzw. der Kombination aus HMD und Pick-to-Light, verglichen mit der alleinigen Anwendung von Pick-to-Light (Guo et al. 2014; Wu et al. 2015; Wu et al. 2016). Guo et al. (2014) kamen in einem Laborexperiment mit acht Probanden zu dem Schluss, dass beim Kommissionieren ein HUD mit einblendeten AR-Konturen als weniger beanspruchend wahrgenommen wird, als ein Pick-by-Light-System. In den aufeinander aufbauenden Studien von Wu et al. (2015; 2016) ermittelten die Forschergruppen ebenfalls mittels NASA-TLX die subjektive Beanspruchung bei Probanden, die Kommissionieraufgaben im Labor ausführten. Das Team testete vergleichend ver-

schiedene Assistenzmodalitäten und stellte fest, dass die subjektive Beanspruchung im Vergleich mit einem Pick-by-HUD geringer ist. Im darauf aufbauenden Experiment zeigte sich die Kombination von Pick-by-Light und HUD als günstig im Sinne der subjektiven Beanspruchung.

Für den VFQ und die EZ-Skala können in der durchgeführten Studie keine Unterschiede zwischen den zwei Assistenzmodalitäten gefunden werden. Durch die RSME hingegen kann eine signifikant höhere erlebte geistige Anstrengung bei den AR-Konturen als bei dem Pick-to-Light-System ermittelt werden. Tendenziell wird dieses Ergebnis auch durch das LGM bestätigt. Ein Erklärungsansatz für dieses Ergebnis kann sein, dass das Finden des nächsten Bauteils für die Probanden schwieriger ist als das Ausmachen der korrekten Position des Bauteils.

Die Hypothese II-H2 muss daher abgelehnt werden.

II-H2a: Die subjektive (visuelle) Beanspruchung ist nach den Montageaufgaben höher als vor dem Versuch. Dies gilt für beide Varianten.

Wie in der Vorstudie wurde die Hypothese aufgestellt, dass die subjektive (visuelle) Beanspruchung nach der Bearbeitung der Arbeitsaufgaben höher ist als vor dem Versuch. Im Post-Hoc-Test können hingegen keine sicheren Unterschiede zwischen der Motivations- und Beanspruchungslage vor dem Versuch und nach den Arbeitsphasen nachgewiesen werden. Auch durch den VFQ können keine gesicherten Differenzen erkannt werden. Eine mögliche Ursache kann die ohnehin geringe Ausprägung von visuellen Beschwerden sein, die auch in Zusammenhang mit der geringen Dauer des Versuchs stehen kann. Frühere Untersuchungen (z. B. Pfendler et al. 2005; Ullmann 2006) zeigen noch deutliche, subjektive Beschwerden und visuelle Irritationen beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme. In aktuelleren Untersuchungen (vgl. auch Tabelle 4) werden tendenziell seltener signifikante Beschwerden festgestellt. Dies kann ein positiver Hinweis darauf sein, dass die bisherigen Entwicklungen dazu beitragen, dass die Systeme besser an die Nutzer angepasst sind oder dass sich die Nutzer zunehmend an das Arbeiten mit Bildschirmen gewöhnen.

Die Hypothese II-H2a muss abgelehnt werden.

II-H2b: Die subjektive (visuelle) Beanspruchung sinkt im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.

Die Hypothese I-H2b konnte nicht bestätigt werden. Es zeigte sich eher eine abnehmende subjektive Beanspruchung. Daher wurde für den virtuellen User-Test angenommen, dass die subjektive (visuelle) Beanspruchung im zeitlichen Verlauf sinkt.

Im zeitlichen Verlauf zeigen sich weder deskriptiv noch statistisch durch den Dunn-Bonferroni-Test bemerkenswerte Unterschiede vom ersten zum zweiten Durchlauf bei den visuellen Be-

schwerden. Das LGM verdeutlicht hingegen, dass sich der Durchlauf signifikant auf die Beschwerde „Kopfschmerzen“ auswirkt. Ebenso zeigen sich bei der EZ-Skala durch den Post-Hoc-Test keine signifikanten Unterschiede, während im LGM ein tendenzieller Einfluss des Durchlaufs auf die Effizienz und ein signifikanter Einfluss des Durchlaufs auf die Selbstsicherheit deutlich werden. Die Probanden gewöhnen sich während des Versuchs offenbar an die Aufgaben und haben das Gefühl effizienter zu arbeiten. Eine Steigerung des Selbstbewusstseins erscheint schlüssig.

Hypothese II-H2b kann daher teilweise angenommen werden.

II-H2c: Die subjektive (visuelle) Beanspruchung unterscheidet sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.

Ähnlich wie bei der Hypothese II-H1c konnten für die Ebene der subjektiven Beanspruchung keine gesicherten Erkenntnisse aus der Literatur gewonnen werden, die eine unterschiedliche subjektive (visuelle) Beanspruchung zwischen den Trainingsarten vermuten lassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die subjektiv empfundene visuelle Beanspruchung sowie die erlebte geistige Anstrengung im virtuellen User-Test weder im Mann-Whitney-U-Test noch im LGM zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe unterscheiden.

In den Binärfaktoren der EZ-Skala zeigt sich ein signifikanter Unterschied in der Selbstsicherheit, wobei diese durch die Desktoptraining-Gruppe höher bewertet wurde. Dies kann im LGM nicht bestätigt werden. Die Kontaktbereitschaft scheint in dieser Gruppe größer zu sein als in der Trainingsfilm-Gruppe. Dies zeigt sich tendenziell durch den Mann-Whitney-U-Test und signifikant im LGM, bleibt allerdings der einzige Faktor, der sich signifikant zwischen den Gruppen unterscheidet.

In der globalen Betrachtung der Hypothese II-H2c kann diese daher bestätigt werden.

Themenkomplex zur objektiven Leistung

II-H3: Die objektiven Leistungsdaten sind bei der Arbeit mit den AR-Konturen besser als bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System.

Wu et al. (2015) zeigten bei Kommissionierungsversuchen, dass die untersuchte Pick-to-Light Modalität verglichen mit der HMD-Variante mit AR-Projektionen bis zu 50 % langsamer war. Ein Folgeversuch zeigte ebenfalls bessere Ergebnisse hinsichtlich der Kommissionierungsgeschwindigkeit bei einem HMD bzw. einer Kombination aus HMD und Pick-to-Light gegenüber Papierlisten bzw. nur Pick-to-Light (Wu et al. 2016). Guo et al. (2014) zeigten ebenfalls Vorteile eines HMDs in Zeit und Fehlerrate bei der Kommissionierung verglichen mit einem Pick-to-Light-System.

Im virtuellen User-Test zeigen sich zwischen der AR-Assistenz und dem Pick-to-Light-System keine signifikanten Unterschiede in der Montagedauer oder der Fehlerrate. Die Ergebnisse aus den bisherigen Forschungsarbeiten können nicht bestätigt werden. Die Fehlerraten wurden durch die insgesamt geringe Anzahl für „Falsches Greifen“ und „Falsche Bauteilausrichtung“ zusammengefasst. In der Beobachtung der Probanden wurde deutlich, dass die Probanden mit dem Pick-to-Light-System weniger Fehler im falschen Greifen, also in der Auswahl des nächsten zu verbauenden Teils, machten, während den Probanden mit den AR-Konturen weniger Fehler in der Bauteilausrichtung unterliefen. Eine Kombination beider Assistenzfunktionen wäre denkbar, da diese zusammen die Schwächen der jeweils anderen ausgleichen können. Wu et al. (2016) konnten z. B. zeigen, dass eine Kombination verschiedener Assistenzfunktionalitäten, hier Pick-by-Light-System und Pick-by-HUD, eine kürzere Bearbeitungszeit (-19 %) und weniger Fehler in ihrem Test verursachte als, in diesem Fall, eine Papierliste. Auch Funk et al. (2016) fanden in zwei User-Tests Hinweise darauf, dass eine Kombination von visuellem und haptischem Feedback helfen kann, Mitarbeitern Arbeitsanweisungen zu geben oder auf Fehler hinzuweisen. Die Autoren führten auch an, dass auditives Feedback meist als störend empfunden wurde.

Damit muss die Hypothese II-H3 abgelehnt werden.

II-H3a: Die objektiven Leistungsdaten verbessern sich im zeitlichen Verlauf – unabhängig von der verwendeten Variante.

Auf Basis verschiedener Forschungsarbeiten (Fjeld et al. 2002; Tang et al. 2003; Schuh et al. 2017) und den Erkenntnissen aus der Vorstudie wurde bei dem virtuellen User-Test davon ausgegangen, dass sich die objektive Leistung der Probanden im Laufe des Versuchs verbessert.

Wie in der Vorstudie sind auch im virtuellen User-Test Lerneffekte zu erkennen. Die Probanden montieren insgesamt vier Wegeventile, wobei sich die Montagedauer im Zeitablauf signifikant verringert. Auch das LGM bestätigt den signifikanten Einfluss des Durchlaufs auf die Montagedauer. Bei der Fehlerzahl ist eine deskriptive Verringerung zu sehen, die jedoch statistisch nicht sicher bestätigt werden kann.

Hypothese II-H3a kann damit teilweise bestätigt werden.

II-H3b: Die objektiven Leistungsdaten unterscheiden sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.

Obwohl Unternehmen hoffen, dass durch den Umstieg von text- und zeichenbasierten Anleitungen auf flexiblere Montageanleitungen mit Animationen und Videos u. a. Anlernzeit und Fehler reduziert werden (Wiesbeck 2014; Menn 2019), konnten Jeske et al. (2014) in ihrer

Studie zwar grundsätzliche Lerneffekte bei Wiederholungen, jedoch keine Unterschiede zwischen Print-, Video- und Animationsanleitungen feststellen.

Im virtuellen User-Test zeigt sich, dass Probanden, die das Desktoptraining absolvierten, signifikant schneller und mit weniger Fehlern das Wegeventil montieren als diejenigen, die den Trainingsfilm anschauten. Dieser signifikante Unterschied zeigt sich jedoch nur bei dem Wegeventil vor dem Puzzle und nicht mehr bei dem Wegeventil nach dem Puzzle. Die Gruppe, die das Desktoptraining absolvierte, scheint somit zu Beginn einen Vorteil gegenüber der Trainingsfilm-Gruppe zu haben. Dieser Effekt gleicht sich jedoch nach kurzer Zeit an. Auch das LGM zeigt einen signifikanten Einfluss des Trainingstyps auf die Montagedauer des Wegeventils vor dem Puzzle, jedoch nicht nach dem Puzzle. Zudem wirkt sich die Trainingsart tendenziell auf die Fehlerzahl bei dem Wegeventil vor dem Puzzle aus.

Hypothese II-H3b kann damit, nach einer ersten Gewöhnung an die Arbeitsaufgabe, bestätigt werden.

Themenkomplex zur Usability und Nutzerakzeptanz

II-H4: Die Gebrauchstauglichkeit und Nutzerakzeptanz werden bei den AR-Konturen besser eingeschätzt als bei dem Pick-to-Light-System.

In ihren Studien zeigten Wu et al. (2015) und Wu et al. (2016) hinsichtlich der Usability eine Tendenz zum Pick-by-HUD (AR-Konturen) verglichen mit dem Pick-to-Light. Noch besser wird jedoch eine Kombination beider Systeme bewertet. Auch die Probanden des Versuchs von Guo et al. (2014) präferierten tendenziell AR-Konturen verglichen mit Pick-to-Light-Systemen.

Über die Hälfte der Probanden aus dem virtuellen User-Test würden in einem zukünftigen Versuch lieber das Pick-to-Light-System nutzen. Statistisch lässt sich dieser Trend auch bei der SUS zeigen, durch die das Pick-to-Light-System besser bewertet wurde als die AR-Konturen. Das LGM bestätigt dieses Ergebnis.

Bei der wahrgenommenen Nützlichkeit und der wahrgenommenen Bedienbarkeit zeigen sich tendenzielle Unterschiede, bei denen das Pick-to-Light System in einigen Aussagen bessere Ergebnisse erzielt.

Lediglich im ISONORM-Fragebogen zeigt das Pick-to-Light eine tendenziell schlechtere Individualisierbarkeit für die Aussage „Das Assistenzsystem lässt sich gut an meine persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen“. Das LGM gibt zudem einen signifikanten Einfluss der simulierten Assistenz auf die Selbstbeschreibungsfähigkeit preis.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Probanden den Einsatz des Pick-to-Light-Systems hilfreicher empfanden als die AR-Konturen, was den bisherigen Forschungsarbeiten widerspricht. Womöglich stellte das Finden des nächsten zu verbauenden Teils in diesem User-Test die größere kognitive Herausforderung für die Probanden dar, die keine Erfahrung in der Montage von Wegeventilen mitbringen, verglichen mit der korrekten Position des Bauteils, sodass das Pick-to-Light-System den Probanden eine größere Unterstützung bot. Allerdings hilft das Pick-to-Light-System in der Regel nicht dabei, den Verbauort zu finden. Hier können AR-Konturen unterstützen. Auch eine Kombination beider Assistenzfunktionen wäre, wie bereits bei Hypothese II-H3 beschrieben, denkbar, da diese zusammen die Schwächen der jeweils anderen Funktion ausgleichen können. Auch hier werden damit die Vorteile von modular aufgebauten, kombinierbaren Assistenzfunktionen deutlich.

Die Hypothese II-H4 muss jedoch abgelehnt werden.

II-H4a: Die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit und Nutzerakzeptanz unterscheiden sich nicht zwischen der Trainingsfilm-Gruppe und der Desktoptraining-Gruppe.

Auch für die Ebene der Gebrauchstauglichkeit konnten keine gesicherten Erkenntnisse aus der Literatur gewonnen werden, die eine signifikant unterschiedliche Bewertung zwischen den Trainingsarten vermuten lassen.

Im Mann-Whitney-U-Test zeigt sich, dass die Probanden, die das Desktoptraining absolviert haben, die Usability des Assistenzsystems mit der SUS tendenziell besser bewerten als die Probanden, die den Trainingsfilm zu Beginn geschaut haben. Die Aussage „Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist für mich klar und verständlich“ wird durch die Desktoptraining-Gruppe signifikant besser bewertet. Die Selbstbeschreibungsfähigkeit, Fehlertoleranz, Individualisierbarkeit sowie Lernförderlichkeit werden durch die Desktoptraining-Gruppe tendenziell (bzw. die Lernförderlichkeit signifikant) besser bewertet. Auch durch das LGM zeigen sich tendenzielle Einflüsse der Trainingsart auf die Individualisierbarkeit und Lernförderlichkeit. Es scheint verständlich, dass die Probanden, die interaktiv den Zusammenbau des Wegeventils üben konnten, ein besseres Verständnis für den Ablauf haben. Vermutlich wird die Verständlichkeit für den Montageprozess auch auf die Gebrauchstauglichkeit des Assistenzsystems übertragen.

Die Hypothese II-H4 muss damit abgelehnt werden.

Themenkomplex zu Korrelationsverbindungen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg

II-H5: Es finden sich Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Ebenen des modifizierten psychophysiologischen Ansatzes nach Fahrenberg (1969).

Die Beantwortung der Hypothese erfolgt anhand der folgenden Nebenhypothesen.

II-H5a: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven (visuellen) Beanspruchung bei der jeweiligen Variante.

Aufgrund der beschriebenen Studien zur Hypothese I-H5a und einigen Korrelaten zwischen objektiven und subjektiven Beanspruchungsparametern in der Vorstudie wurden diese Zusammenhänge auch für den virtuellen User-Test angenommen.

Für die AR-Konturen werden beim VFQ einige Wechselwirkungen deutlich. Insbesondere bei der Beschwerde „Blendung durch Lichter“ ergeben sich leichte bis mittlere signifikante Zusammenhänge, die darauf hindeuten, dass eine höhere subjektive visuelle Beanspruchung mit einer höheren physiologischen Beanspruchung assoziiert ist. Auch Mean NN [ms] und Mean HR [1/min] zeigen mittlere signifikante Zusammenhänge zu einigen VFQ-Items, die vermuten lassen, dass die subjektive visuelle und physiologische Beanspruchung miteinander in Zusammenhang stehen. Bei dem Pick-to-Light-System zeigen sich ähnliche Zusammenhänge zwischen den VFQ- und HRV-Parametern. Hier sind zudem bei dem Item „Schwierigkeiten Linien zu verfolgen“ ähnlich viele signifikante Korrelate zu erkennen wie bei dem Item „Blendung durch Lichter“.

Zwischen der EZ-Skala und den HRV-Parametern existieren kaum signifikante Korrelationen. Am auffälligsten erscheinen Zusammenhänge der HRV-Parameter zur Schläfrigkeit bei der Verwendung des Pick-to-Light-Systems, bei der eine stärkere subjektive Bewertung der Schläfrigkeit auch mit einer erhöhten physiologischen Beanspruchung assoziiert ist.

Die RSME zeigt bei beiden Varianten keinerlei signifikante Zusammenhänge zu den HRV-Parametern.

Abschließend lässt sich zur Hypothese zusammenfassen, dass – wie bei der Vorstudie – einige Zusammenhänge zwischen den HRV-Parametern und Einzelfaktoren der subjektiven Beanspruchung, insbesondere der VFQ-Parameter, gefunden werden konnten, jedoch zeigte die eindimensionale Skala der RSME keinerlei Zusammenhänge zu den HRV-Parametern.

Wie bereits in der Vorstudie scheinen die globalen Instrumente zur subjektiven Beanspruchungsermittlung (NASA-TLX und RSME) weniger stark mit den HRV-Parametern in Zusammenhang zu stehen als Instrumente, die Einzeldimensionen der Beanspruchung stärker in den Blick nehmen.

Die Hypothese II-H5a kann damit teilweise bestätigt werden.

II-H5b: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.

Durch die bisherigen Forschungsergebnisse und die Teilbestätigung der Hypothese I-H5b für die Vorstudie wurden Zusammenhänge zwischen den HRV-Parametern und den objektiven Leistungsdaten auch für den User-Test (VR) angenommen.

Sowohl bei der Arbeit mit den AR-Konturen als auch bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System können einige signifikante Korrelationen aufgezeigt werden. Interessant ist jedoch die teils gegensätzliche Wirkrichtung. Während beispielsweise eine längere Montagedauer des Wegeventils vor dem Puzzle bei den AR-Konturen mit einer höheren Beanspruchung (SDNN [ms] und SD2 [ms]) assoziiert ist, ist sie bei dem Pick-to-Light System mit einer geringeren Beanspruchung bei denselben HRV-Parametern assoziiert. Dies zeigt deutlich, dass unterschiedliche Assistenzmodalitäten unterschiedliche kardiophysiologische Auswirkungen auf den Nutzer haben können.

Die Hypothese II-H5b kann teilweise bestätigt werden.

II-H5c: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten bei der jeweiligen Variante.

Wie für die Vorstudie wurden auch für den virtuellen User-Test mögliche Zusammenhänge zwischen den Fragebögen zur subjektiven (visuellen) Beanspruchung und den objektiven Leistungsdaten analysiert.

Je stärker die Probanden bei den AR-Konturen Schwierigkeiten haben Linien zu verfolgen oder durch Lichter geblendet werden, desto länger brauchen sie für die Montage des Wegeventils vor dem Puzzle. Bei dieser Assistenzmodalität zeigt sich auch die Wechselbeziehung zwischen einer hohen allgemeinen subjektiven Beanspruchung und einer längeren Dauer zur Montage des Wegeventils nach dem Puzzle. Es zeigt sich auch, dass je kleiner die Motivation, Aktivierung, Effizienz, Anstrengungsbereitschaft, Kontaktbereitschaft, Selbstsicherheit und Stimmungslage ist, desto länger ist auch die Montagedauer des Wegeventils nach dem Puzzle.

Für das Pick-to-Light-System zeigt sich: Je höher die subjektiven visuellen Beschwerden wie springender Text, Doppelsehen oder Nackenschmerzen ausgeprägt sind, desto länger brauchen die Probanden für die Montage bzw. machen mehr Fehler. Eine hohe Ausprägung des Binärfaktors „Beanspruchung“ scheint mit einer hohen Fehleranzahl bei der Montage des ersten Wegeventils zusammenzuhängen. Paradox erscheint, dass auch eine hohe bzw. gute Motivation, Aktivierung, Defizienz, Anstrengungsbereitschaft, Kontaktbereitschaft und Stimmungs-

lage mit einer hohen Fehleranzahl bei der Montage des ersten Wegeventils assoziiert ist. Mögliche Erklärungen könnten sehr ehrgeizige Probanden sein, die schnell arbeiten aber ggf. eher die Funktionalitäten ausprobieren und Fehler machen, als langsam und genau zu arbeiten.

Die Hypothese II-H5c kann teilweise bestätigt werden.

II-H5d: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit / Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.

Es zeigen sich für die AR-Konturen schlüssige Zusammenhänge z. B. zwischen einer gut wahrgenommenen Nützlichkeit, Aufgabenangemessenheit, Steuerbarkeit und Erwartungskonformität zu Mean NN [ms] und Mean HR [1/min], die vermuten lassen, dass eine gute Usability bzw. Nutzerakzeptanz mit einer geringeren physiologischen Beanspruchung assoziiert ist. Paradox erscheint, dass eine gut wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit und eine gute Erwartungskonformität mit einer Verringerung von SD HR [1/min] zusammenhängt, was auf eine höhere Beanspruchung schließen lässt. Der positive Zusammenhang zwischen der Erwartungskonformität und SD HR [1/min] zeigt sich bei der Arbeit mit dem Pick-to-Light-System.

Die Hypothese-H5d kann damit teilweise bestätigt werden.

II-H5e: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der subjektiven (visuellen) Beanspruchung und der Gebrauchstauglichkeit / Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.

Durch die Bestätigung der Hypothese I-H5e wurde der Zusammenhang zwischen der subjektiv empfundenen Beanspruchung und der Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit auch für den virtuellen User-Test angenommen.

Bei beiden Assistenzmodalitäten im User-Test sind Zusammenhänge zwischen den Messinstrumenten zur Gebrauchstauglichkeit und der subjektiven Beanspruchung erkennbar.

Eine höhere subjektive Beanspruchung (mittels RSME) ist mit einer geringeren Bewertung der Usability mittels SUS-Score assoziiert. Ebenso steht eine stärkere Ausprägung der visuellen Beschwerden in Wechselbeziehung mit einer schlechteren Bewertung der Gebrauchstauglichkeit. Die Binärfaktoren der EZ-Skala sind ebenfalls teilweise mit den Usability-Parametern assoziiert. Sie sprechen für einen positiven Zusammenhang. Die stärkste positive Korrelation findet sich zwischen der Motivation und der Steuerbarkeit ($r = 0,622^{**}$).

Die Hypothese II-H5e kann damit angenommen werden.

II-H5f: Es finden sich Zusammenhänge zwischen den objektiven Leistungsdaten und der Gebrauchstauglichkeit / Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.

Zusammenhänge zwischen den objektiven Leistungsdaten und der Gebrauchstauglichkeit konnten in der Vorstudie nur in geringem Maße nachgewiesen werden.

Im virtuellen User-Test zeigen sich bei der Montage mit den AR-Konturen einige schwache bis mittlere negative Korrelationen, die darauf hindeuten, dass eine gut wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit mit einer geringeren Fehleranzahl und einer geringeren Montagedauer zusammenhängt. Zwischen der Lernförderlichkeit und der Fehleranzahl beim Wegeventil nach dem Puzzle wird ein signifikanter positiver Zusammenhang deutlich. Möglicherweise schätzen Probanden, die verhältnismäßig viele Fehler machen, den Lerneffekt durch das Assistenzsystem höher ein. Bei dem Pick-to-Light-System lassen sich keinerlei signifikante Korrelate erkennen.

Die Hypothese II-H5f kann damit teilweise bestätigt werden.

II-H5g: Es finden sich Zusammenhänge zwischen den verschiedenen subjektiven (visuellen) Beanspruchungsparametern bei der jeweiligen Variante.

Da die Hypothese I-H5g für die Vorstudie teilweise angenommen wurde, wurde auch in dieser Teilstudie ein Zusammenhang zwischen den subjektiven Beanspruchungsparametern des VFQ, der EZ-Skala und der RSME angenommen.

Bei den AR-Konturen wird deutlich, dass eine hohe subjektive Beanspruchung (ermittelt durch die RSME) mit einer niedrigen Beanspruchung (ermittelt durch die EZ-Skala) assoziiert ist. Dies scheint paradox. Eine mögliche Erklärung ist, wie bereits in dieser Arbeit beschrieben, dass die EZ-Skala die Beanspruchung im Sinne einer Aktivierung und damit als positive kurzfristige Beanspruchungsfolge erfasst. Bei den AR-Konturen zeigt sich auch der Zusammenhang einer hohen subjektiven Beanspruchung (durch die RSME) mit einer geringeren Anstrengungsbereitschaft und einer geringeren Erholungsfähigkeit. Es existieren einige zumeist negative Korrelationen zwischen den visuellen Beschwerden des VFQ und den Binärfaktoren der EZ-Skala. Am stärksten sind diese zwischen Kopfschmerzen und Schläfrigkeit sowie geistiger Ermüdung und Erholtheit. Bei dem Pick-to-Light-System ist eine hohe erlebte geistige Anstrengung mit vermehrten Kopfschmerzen und Übelkeit assoziiert. Auch beim Pick-to-Light zeigen sich einige wenige, schwach negative Korrelationen zwischen den VFQ-Items und den EZ-Binärfaktoren (z. B. Augen sind gereizt oder brennen und der Erholtheit).

Die Hypothese II-H5g kann damit teilweise angenommen werden.

II-H5h: Es finden sich Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern zur Usability und Nutzerakzeptanz bei der jeweiligen Variante.

Ein Bericht des Umweltbundesamtes in Berlin zur Gebrauchstauglichkeit des Unionsregisters zum EU-Emissionshandel zeigte höchst signifikante positive Korrelationen zwischen den summierten Werten der sieben ISONORM-Dimensionen und dem Score der SUS. Hier wurde der ISONORM-Fragebogen ebenfalls zur Konkretisierung des globalen SUS-Wertes eingesetzt

(Umweltbundesamt 2016). Auch Kretschmer & Terharen (2019) konnten signifikante positive Zusammenhänge zwischen der SUS und verschiedenen Teilskalen des UEQ (Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz, Stimulation, Originalität) aufzeigen.

Es sind für beide Assistenzmodalitäten signifikante, positive Korrelationen zwischen der SUS und den TAM-Skalen, sowie teilweise signifikante, positive Korrelationen zwischen den TAM-Skalen und den Einzeldimensionen des ISONORM-Fragebogens erkennbar. Die Ergebnisse wurden durch die Arbeitsgruppe publiziert (Schmidt et al. 2020).

Die Hypothese II-H5h kann damit angenommen werden.

4.1.3 User-Test (Real)

Themenkomplex zur psychophysiologischen Beanspruchung

III-H1a: Die objektive physiologische Beanspruchung ist während der Montage höher als in der Ruhephase.

Die Vorstudie hat gezeigt, dass HF [%] auf eine höhere Beanspruchung während der Montage als in den Ruhephasen hindeutet. Der virtuelle User-Test zeigte HRV-Parameter auf, die diese Wirkrichtung bestätigten (SDNN [ms], SD HR [1/min], SD2 [ms], DFA 1), jedoch auch Parameter, die eine höhere Beanspruchung in der Ruhephase zeigten (Mean NN [ms], Mean HR [1/min] und HF [%]).

Im realen User-Test zeigt sich, wie im virtuellen User-Test, ein uneinheitliches Ergebnis. Bei Mean HR [1/min] kann einerseits ein signifikanter Unterschied zwischen der Ruhephase und der Montagephase gefunden werden, der darauf hindeutet, dass die Beanspruchung in der Montagephase größer ist. Auch Mean NN [ms] zeigt diesen Zusammenhang tendenziell. Andererseits deuten RMSSD [ms] und SD1 [ms] tendenziell auf eine höhere Beanspruchung in der Ruhephase hin. An dieser Stelle bleibt damit erneut die Gestaltung der Ruhephase zu diskutieren. Im realen User-Test fand die Ruhephase am Ende des Versuchs in einem ruhigen Nebenraum statt. Eine Versuchsleitung war nicht anwesend, um ein Gefühl der Überwachung, welches im virtuellen User-Test vermutet wurde, zu vermeiden. An dieser Stelle ist auch möglich, dass sich die Probanden eher bewegt haben und daher vermeintlich höhere Beanspruchungswerte in der Ruhephase zu erkennen sind.

Die Hypothese III-H1a kann damit nur teilweise bestätigt werden.

III-H1b: Die objektive physiologische Beanspruchung bei der realen Montage ist geringer im Vergleich zur virtuellen Montage.

In der zweiten und dritten Teilstudie dieser Arbeit wurde der Zusammenbau eines Wegeventils einmal in einer virtuellen und einmal in einer realen Umgebung getestet. Als Nebenfragestellung sollte geklärt werden, ob sich die physiologische Beanspruchung zwischen der virtuellen und realen Montage unterscheiden.

Es gibt Hinweise, dass die Exposition gegenüber VR-Technik negative Beanspruchungsfolgen verursachen kann (Theis et al. 2016; Kirchhoff et al. 2017; Engel 2019). Auch Malińska et al. (2015) führten eine Studie mit 19 jungen Probanden durch, um ein einstündiges virtuelles Montagetraining anhand von HRV-Parametern zu bewerten. Die Autoren wiesen eine signifikant erhöhte Beanspruchung durch den Anstieg der LF-Spektralleistung nach 30 Minuten nach. Auch bei LF/HF zeigte sich in einigen Zeitabschnitten während des einstündigen Trainings eine Erhöhung. Daneben zeigten auch Gao et al. (2019) bereits bei einer deutlich kürzeren Testdauer von zehn Minuten, dass bei der Betrachtung eines virtuellen Zauberwürfels, im Gegensatz zur Betrachtung eines realen Zauberwürfels, die physiologische Beanspruchung, ermittelt durch die HRV, bei der virtuellen Betrachtung mittels eines OST-HMDs höher ist.

Für diese Arbeit deuten die HRV-Parameter SD HR [1/min], HF [%] sowie LF [%] ebenfalls auf eine geringere physiologische Beanspruchung im realen Umfeld als im virtuellen Umfeld hin.

Die Hypothese III-H1b wird damit teilweise angenommen.

III-H2a: Die subjektive Beanspruchung bei der realen Montage ist geringer im Vergleich zur virtuellen Montage.

Obwohl es Hinweise darauf gibt, dass Probanden die subjektive Beanspruchung in virtuellen Umgebungen, auch im Vergleich zu realen Umgebungen (Theis et al. 2016; Kirchhoff et al. 2017; Engel 2019; Gao et al. 2019), höher einschätzen, konnte zwischen den zwei User-Tests mithilfe der RSME kein signifikanter Unterschied im subjektiven Beanspruchungsempfinden festgestellt werden. Dieses Ergebnis kann auch ein Hinweis darauf sein, dass Versuche unter VR-Bedingungen die tatsächliche Beanspruchung realitätsnah darstellen können. Dies könnte auch zukünftig helfen Beanspruchungsuntersuchungen relativ schnell und kostengünstig mittels VR zu simulieren, bevor prototypische Assistenzsysteme zur Verfügung stehen.

Die Hypothese III-H2a muss abgelehnt werden.

Themenkomplex zur Usability und Nutzerakzeptanz

III-F1: Wie bewerten die Probanden die einzelnen Komponenten des Assistenzsystems hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit?

Sowohl die Einzelschrittanweisung als auch die Montageschrittanleitung werden von den Probanden grundsätzlich positiv bewertet, weisen jedoch beide Schwachpunkte auf. In der Einzelschrittanweisung sind die Bauteilnummern nicht aufgeführt und in der Montageschrittanleitung fehlen Informationen zum benötigten Werkzeug. Das führt dazu, dass die Probanden während des Versuchs zwischen den Anzeigen wechseln müssen, um alle nötigen Informationen zu bekommen. Hier könnten zukünftig die fehlenden Angaben ergänzt, oder eine Kombination beider Anzeigen vorgenommen werden. Es sollte noch zielgenauer und bewusster gestaltet werden, wohin die Aufmerksamkeit des Nutzers gelenkt werden soll und welche Informationen als „nice to know“ oder „need to know“ einzustufen sind. Redundante Informationen sollen bei einer Kombination der Einzelschrittanweisung und der Montageschrittanleitung vermieden werden (vgl. auch Interaktionsprinzipien der DIN EN ISO 9241-110). Zudem nehmen die Probanden die Einzelschrittanweisung meist erst im Verlauf des Montageprozesses wahr. Die Montageschrittanweisung scheint durch ihre farbliche Gestaltung mehr ins Auge zu fallen und der erste Anknüpfungspunkt für die Montage zu sein. Allerdings werden auch hier Probleme hinsichtlich Informationsfülle (zu viele bzw. unnötige Informationen) und Schriftgröße (abgeschnittene Wörter) benannt, die angepasst werden sollten. In der Digitalisierung allgemein und in der Entwicklung digitaler Assistenzsysteme im Speziellen stellt die Technik kaum den limitierenden Faktor dar (z. B. Module zusammenschließen, Verwendung mehrerer Bildschirme und Informationsquellen), jedoch ist die menschliche Verarbeitungsfähigkeit begrenzt (Strobach & Wendt 2019). In diesem Sinne muss eine Informationsüberflutung vermieden werden. Weiterhin sollten Werkstücke, die bereits vormontiert sind (in diesem Versuch das Ankerrohr), nicht als einzelne Bauteile, sondern als eine Komponente aufgeführt werden.

Das CAD-Modell wird nicht von allen Probanden in vollem Umfang genutzt. Hier zeigt sich deutlich, dass eine zielgerichtete Einführung in ein neues Assistenzsystem wichtig ist, um das volle Potenzial der Technologie ausschöpfen zu können. Auch kann vermutet werden, dass unterschiedliche Nutzergruppen im Montagebereich (Anfänger, Gelegenheitsnutzer, Experten) einen unterschiedlichen Unterstützungsgrad benötigen und die Informationen, z. B. für geübte Nutzer, weniger hilfreich sind als für unerfahrene Bediener. Die Entwicklung neuer Produkte geschieht heutzutage nahezu flächendeckend digital, d. h. unter Zuhilfenahme von CAD-Modellen. Dies bietet die Basis, um auch die folgenden Prozesse wie die Montage- und Prüfplanung, Dokumentation und Auswertung digital abzubilden und damit Medienbrüche zu vermeiden (vgl. auch Interaktionsprinzipien der DIN EN ISO 9241-110) und bestehende Daten

effektiv und effizient zu nutzen. Zudem bietet dies die Möglichkeit, Daten verschiedener Quellen zu verknüpfen, die Aktualität der zur Verfügung gestellten Informationen zu gewährleisten und nachhaltig Ressourcen (z. B. Papier) zu sparen. Dieser Umstieg eines analogen Vorgehens zu einem digitalen ist jedoch gerade für kleine und mittlere Unternehmen eine Herausforderung.

Besonders die Komponente der AR-Konturen und ihre farbliche Gestaltung wurden von den Probanden als sehr gute Unterstützung gelobt. Hier ist zu bemerken, dass die Probanden keinerlei Erfahrung in Montagetätigkeiten mitbrachten. Für erfahrene Mitarbeiter können Assistentenfunktionen gegebenenfalls zu behindernden Faktoren werden, wenn der Nutzer die erforderlichen Fähigkeiten für die Montage des Produkts bereits besitzt (Wilschut et al. 2019). Funk et al. (2017) zeigten z. B. in einer Feldstudie, dass sich die Verwendung von In-situ projizierenden Anweisungen in der manuellen Montage bei unterschiedlichen Benutzergruppen anders auswirkt. Die Ergebnisse zeigten einen Leistungsabfall bei sachkundigen, fortgeschrittenen Mitarbeitern und einen Lernerfolg bei neuen, ungeschulten Mitarbeitern. Es ist davon auszugehen, dass Mitarbeiter mit wenig Erfahrung mehr Informationen benötigen als Mitarbeiter, die viel Montageerfahrung haben (Gräßler et al. 2020). Auch die Altersstruktur von Nutzern muss mitbeachtet werden. Wille (2016) zeigte in seiner Replikationsstudie u. a., dass ältere Nutzer subjektiv stärker durch HMDs beansprucht waren als jüngere Teilnehmer. Dies verdeutlicht, wie wichtig die Analyse der Nutzermerkmale und die Anpassung des Assistenzsystems an die Fähigkeiten der Nutzer ist. An dieser Stelle sei zudem darauf hingewiesen, dass die AR-Unterstützung im realen User-Test auch als Spatial AR bezeichnet werden kann, d. h. es erfolgt eine Erweiterung der realen Welt, ohne dass spezielle Displays (wie im virtuellen User-Test) getragen werden müssen. Spatial AR nutzt die Vorteile der AR-Technologie an einem festinstallierten Arbeitsplatz und klammert Nachteile durch die Hardware, z. B. ungenügende Ergonomie des HMDs, aus. Dazu zählen mitunter auch die Schwierigkeit für Brillenträger HMDs zu nutzen, da durch das zusätzliche HMD z. B. Druckbeschwerden am Kopf auftreten können. Auch Büttner et al. (2016) zeigten, dass Brillenträger häufiger Probleme mit HMDs haben und Wille et al. (2014) gaben zu bedenken, dass Beschwerden mitunter eher von der Hardware als von der Software ausgelöst werden können. Zudem können Gesichtsfeldverdeckungen durch HMDs vermieden werden (Darius et al. 2015). Auch die Untersuchung von Kim et al. (2019) zeigt, wie wichtig die Benutzerschnittstelle und Softwareergonomie gegenüber der eigentlichen Hardware sind. Festgehalten werden kann an dieser Stelle mit Sicherheit, dass beide Komponenten eine Schlüsselfunktion im Beanspruchungsempfinden und in der Usability-Bewertung innehaben.

Die Beschriftung der Bauteile und Baukästen ist grundsätzlich wichtig und hilfreich, jedoch ist ebenso die korrekte Ausgestaltung, z. B. die Neigung der Baukästen und die Darstellung der

Artikelnummern auf Basis der bestehenden Richtlinien der (Software)-Ergonomie, für ein gebrauchstaugliches Arbeiten unerlässlich. Eine Probandin wünscht sich eine Kürzung der Artikelnummern. Dies ist in der Montage kaum umsetzbar, weil Artikelbezeichnungen nicht verändert werden können. Dennoch ist es denkbar, eine andere Visualisierung vorzunehmen, z. B. Chunks²⁹ zu kreieren, bei der durch die Gruppierung von Informationen das Kurzzeitgedächtnis effektiver genutzt werden kann (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2000); Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. 2016).

Die Statusanzeige soll eine Orientierung geben, an welchem Punkt sich der Nutzer im Montageprozess befindet. Sie wird jedoch, wie die Einzelschrittanweisung, meist erst spät im Montageprozess entdeckt. Nach Aringer-Walch et al. (2018) sollten solche stimulierenden Elemente eingesetzt werden, um z. B. Informationen zum eigenen Arbeitsfortschritt zu bekommen. Allerdings muss beachtet werden, dass gerade sich bewegende Objektive zu einer visuellen Überforderung führen können und daher sparsam eingesetzt werden sollten (Drössler et al. 2018; Seidler et al. 2018; Junghanns & Kersten 2020).

In den qualitativen Interviews berichten die Probanden von Spaß und einer geringen Anstrengung bei der Montage. Sie vermuten jedoch auch, dass ein häufiges Wiederholen des Vorgangs zu Monotonie und ggf. einer Unterforderung führen kann. Assistenzsysteme zur Werkerunterstützung bergen durch die Übernahme von Koordinations- und Kontrollfunktionen die Gefahr den Mitarbeiter zu unterfordern, seine Motivation zu senken und Monotonie und Frustration zu erzeugen. Diesen möglichen Problemen kann durch Gamification, „*the use of game design elements in non-game contexts*“ (Deterding et al. 2011), entgegengewirkt werden (Gebauer 2017; Murauer & Huber 2018). Auf diese Weise kann die realistische Darstellung arbeitsbezogener Tätigkeiten durch virtuelle Trainingsszenarien (z. B. Serious Games) helfen, Mitarbeiter weiterzubilden, Wissen zu vermitteln und neue Fähigkeiten zu trainieren. Serious Games werden heute bereits u. a. in der Luftfahrtindustrie, im chirurgischen Bereich, in der Automobilbranche und bei professionellen Sportlertrainings genutzt (Kretschmer et al. 2018). Zur Vergrößerung der Autonomie und des Handlungsspielraums sind zudem wählbare Einstellungen zum Unterstützungsgrad sinnvoll (Aringer-Walch et al. 2018).

Der Lerneffekt durch das Assistenzsystem wird von den Probanden als sehr hoch eingeschätzt. Auch hier sei jedoch darauf hingewiesen, dass es sich um unerfahrene Nutzer handelt.

²⁹ Ein Chunk ist ein Teilstück eines größeren Ganzen. Chunking beschreibt die Teilung von Inhalten in kleinere Informationseinheiten nach Miller (1956), damit Nutzer die Informationen besser kognitiv verarbeiten können. Ein Beispiel ist die Trennung von Telefonziffern durch Leerzeichen.

Themenkomplex zu Korrelationsverbindungen im Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg

III-H3: Es finden sich Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven Beanspruchung.

Mithilfe der Vorstudie und des virtuellen User-Tests konnten teilweise Zusammenhänge zwischen der objektiven und subjektiven Beanspruchung dargestellt werden.

Bei dem User-Test im realen Umfeld kann lediglich zwischen LF-Peak [Hz] und RSME eine signifikante hohe positive Korrelation ausgemacht werden. Da dies der einzige korrelierende Parameter ist, muss dieser Zusammenhang eher als zufälliges Ergebnis betrachtet werden.

Die Hypothese III-H3 muss global betrachtet daher abgelehnt werden.

4.2 Limitationen der Studien

Die Aussagekraft der durchgeführten Teilstudien kann durch einige Faktoren beeinflusst sein, die im Folgenden erläutert werden.

Für alle Teilstudien sind relativ junge Probandenkollektive ohne professionelle Erfahrungen bei Montagetätigkeiten untersucht worden. Dabei handelte es sich zumeist um Studierende oder Hochschulabsolventen. Unterschiedliche Generationen empfinden Digitalisierung und Arbeit 4.0 jedoch anders. Überspitzt zusammengefasst sind die Generation Y (geboren ab 1980) und die Generation Z (geboren ab 1995) „ständig auf der Suche nach neuen Apps [...] [und dem] Austausch mit Dritten über soziale Netzwerke“ (Kardys & Walle 2018, S. 31), während die Generation der Babyboomer (geboren ab 1950) „die ständigen E-Mails und den vermehrten Umgang mit neuen Technologien in der Arbeitswelt als übermäßige Belastung“ (Kardys & Walle 2018, S. 31) empfindet. Diese Alters- oder auch Geschlechtseinflüsse spielen jedoch im Rahmen von Mensch-Technik-Studien bisher kaum eine Rolle (Höhn et al. 2016). Auch weitere moderierende Variablen wie die Unternehmenskultur, das Interesse an der Stärkung der digitalen Kompetenz, die erlebte Sinnhaftigkeit der Arbeit oder die Organisation an sich können Einfluss auf die Motivations- und Beanspruchungslage und die Leistung der Generationen haben. Die aufgeführten Ergebnisse lassen sich daher nicht ohne Weiteres auf alle Nutzergruppen (z. B. ältere Beschäftigte oder Montagemitarbeiter) übertragen. Jedoch können digitale Assistenzsysteme auch für Menschen mit Behinderungen und leistungsgewandelte Mitarbeiter neue Möglichkeiten zu beruflicher Teilhabe, beruflicher Weiterbildung und Weiterentwicklung der Persönlichkeit bieten (Wache 2020).

Die Versuche in allen drei Teilstudien waren explorative Untersuchungen, die kleine Stichproben umfassten ($n = < 30$). Jedoch führte Nielsen bereits 1993 und 1997 an, dass in Usability-Tests keine großen Versuchspersonengruppen nötig seien, da bereits sechs Probanden die

meisten Fehler in Systemen entdeckten und jeder weitere Experte im Wesentlichen die bereits genannten Fehler bestätigte.

Es ist zudem nicht auszuschließen, dass ein Selektionsbias in der Stichprobe besteht. Dadurch, dass Probanden in der Regel durch Aushänge akquiriert wurden, ist anzunehmen, dass sich insbesondere Personen in den Versuchen beteiligten, die technikaffin sind oder Spaß an Montageaufgaben haben. Eine „Überschätzung“ der positiven Ergebnisse ist damit möglich.

Hinsichtlich der Erfahrung mit digitalen Assistenzsystemen fallen Unterschiede zwischen den Teilstudien auf. In der Vorstudie kreuzen 87 % der Probanden an, dass sie keine Erfahrung mit digitalen Assistenzsystemen haben, während in dem virtuellen User-Test nur 8 % und im realen User-Test 27 % der Probanden keine Erfahrung angeben. Dies kann dem Umstand geschuldet sein, dass im Fragebogen der Vorstudie nicht genauer erläutert wurde, was unter einem digitalen Assistenzsystem verstanden wird. Aufgrund dieser Erfahrung wurden in den User-Tests digitale Assistenzsysteme als z. B. Smartphone, Tablet, Datenbrille, Smartwatch, Datenhandschuh definiert. Trotz dieser Beispiele kann, auch aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse in den Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen zwischen den User-Tests bei einer z. B. hinsichtlich Alter ähnlichen Probandengruppe, nicht davon ausgegangen werden, dass alle Probanden die Frage gleichermaßen verstanden und beantwortet haben. Hier wird nochmal die Schwierigkeit durch die Uneinheitlichkeit des Begriffs „digitales Assistenzsystem“ deutlich.

Es ist bekannt, dass bei hinreichend großen Stichproben auch kleine Effekte statistisch bedeutsam werden können. Kleine Stichproben hingegen bringen oft keine statistisch signifikanten Ergebnisse. Dies kann jedoch nicht als Beweis gewertet und verallgemeinert werden, dass kein tatsächlicher Unterschied vorliegt. Nicht-signifikante Ergebnisse kleiner Stichproben sind zwar weniger belastbar, ein positiver Befund sollte jedoch nicht als Nicht-Existenz eines Effekts interpretiert werden. Nicht signifikante Ergebnisse bedeuten nicht, dass ein Ergebnis nicht wichtig ist (Ziliak & McCloskey 2016; Amrhein et al. 2019). Daher wurden in dieser Arbeit auch tendenzielle Unterschiede beachtet und erläutert, um möglichst keine Effekte zu übersehen.

In den Teilstudien dieser Dissertation wurden die Assistenzsysteme für kurze Zeitintervalle untersucht. Die Ergebnisse und insbesondere die Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme können daher nicht ohne Weiteres auf einen vollen Arbeitstag oder längere Zeitintervalle übertragen werden. Um hier gesicherte Aussagen treffen zu können, müssen Langzeituntersuchungen, wie sie z. B. Ullmann (2006) durchgeführt hat, mit arbeitsphysiologischen Methoden ergänzt werden.

Die Vorstudie und zwei User-Tests sind eher den Laboruntersuchungen als den Feldversuchen zuzuordnen. Es wurde allerdings in der Planung und Durchführung darauf geachtet, dass die Versuchsbedingungen möglichst praxisnah sind. Insbesondere die User-Tests orientierten sich stark an den realen Arbeitsbedingungen des Industriepartners. Es war geplant eine Felduntersuchung mit Montagemitarbeitern direkt im Unternehmen durchzuführen. Jedoch konnte dies durch die Covid-19-Pandemie nicht im angestrebten Zeitrahmen umgesetzt werden.

Betrachtet wurden in dieser Arbeit Arbeitsplätze der industriellen Produktion. Digitalisierungsprozesse nehmen jedoch auch zunehmend Eingang in die Bereiche Verwaltung, Dienstleistung und Handwerk (Spieth et al. 2020). Bei allen Digitalisierungsprozessen bleibt zu beachten, dass Prozesse zunächst optimiert und dann digitalisiert werden sollen. Eine Digitalisierung „schlechter“ analoge Prozesse ist nicht hilfreich und Digitalisierung sollte kein Selbstzweck sein.

Im Folgenden wird näher auf die Limitationen der eingesetzten Verfahren eingegangen.

Zur Ermittlung der Usability wird häufig und wurde auch hier in zwei Teilstudien die SUS genutzt. Sie ist eine Methode, die besonders schnell angewendet werden kann, liefert jedoch durch einen Gesamtscore keine Ansatzpunkte, um bei einer „schlechten“ Gebrauchstauglichkeit diese zu verbessern. Daher wurde die Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit im virtuellen User-Test durch die Fragebögen des ISONORM und die Teilskalen des TAM ergänzt.

Zur Einschätzung der visuellen Beanspruchung wurde der VFQ eingesetzt. Auch dieser Fragebogen ist nicht frei von Kritik. Insbesondere ist fragwürdig, ob alle Einzelitems des Fragebogens auf dasselbe Phänomen schließen lassen. Eine Faktorenanalyse durch den Autor des VFQ wäre sinnvoll gewesen, um einzelne Items zu gruppieren (Wille 2016). Auch die HRV ist mittlerweile eine gängige Methode in der Arbeitsmedizin und -physiologie, um Beanspruchungen zu erfassen und die Aktivierung und Regulationsfähigkeit zu beurteilen. Jedoch sind bisher nicht alle Parameter zweifelsfrei im Sinne der Beanspruchung, Aktivierung, Regulationsfähigkeit und Steuerung der Regulationssysteme zu interpretieren. Weitere Forschung ist hier nötig.

Die Methode des Lauten Denkens wurde im realen User-Test als tieferführende Analysemethode zu den gängigen quantitativen Usability-Fragebögen, die bereits in der Vorstudie und im virtuellen User-Test genutzt wurden, eingesetzt. Allerdings bestehen auch hier Limitationen, z. B. hinsichtlich des Effekts der sozialen Erwünschtheit und der Vollständigkeit von Verbalisierungen (Konrad 2010). Teils wird auch die „Objektivität des Lauten Denkens im Sinne der Neutralität der beteiligten Personen“ (Würffel 2001, S. 170) sowie die schwierige Kontrollierbarkeit und bedingte Reproduzierbarkeit kritisiert, wohingegen gerade die Subjektivität der Probanden und die offene prozessbezogene Herangehensweise eine bedeutsame Informati-

onsquelle darstellt. Diesbezüglich konnte auch im Versuch beobachtet werden, dass es einigen Probanden leichter fiel als anderen ihre Gedanken zu verbalisieren. Möglicherweise entstandene fehlende Informationen durch die Überforderung einiger Probanden zur Anweisung des Lauten Denkens, konnten jedoch durch die teilnehmende Beobachtung und die retrospektiven Interviews kompensiert werden.

Sowohl im virtuellen auch als auch im realen User-Test wäre der Einsatz eines Eye Tracking-Verfahrens sinnvoll gewesen, um die subjektiven Aussagen der Probanden und die Beobachtungen, z. B. hinsichtlich der Blickbewegungen und Aufmerksamkeitsprozesse, zusätzlich zu überprüfen (Nielsen & Pernice 2010; Bergstrom & Schall 2014). Die Einrichtung, Datenerhebung und Auswertung mittels Eyetracker benötigt jedoch personelle und finanzielle Ressourcen, die im Rahmen dieser Studien nicht zur Verfügung standen.

4.3 *Schlussfolgerungen und Ausblick (für die Praxis)*

Trotz aller beschriebener Erkenntnisse wird unter Beachtung der Unterschiede in der Art von Assistenzsystemen, der Nutzergruppen und der Hard- und Software klar, dass mit dieser Dissertation nur Teile der bestehenden Forschungslücke zu den gesundheitlichen Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf den Menschen geschlossen werden konnten.

So stehen am Ende dieser Arbeit weitere Fragen und Herausforderungen im Raum, die in Folgeuntersuchungen beleuchtet werden müssen. Es fehlen weiterhin Studien, die die Langzeitwirkung digitaler Assistenzsysteme betrachten. Zudem müssen die Laborversuche stärker an den realen Arbeitsbedingungen und mit den tatsächlichen späteren Nutzergruppen durchgeführt werden. Die Beurteilung der Beanspruchung beim Einsatz neuartiger Systeme ist essenziell, jedoch reicht die eindimensionale Betrachtung der subjektiven Beanspruchung, wie es die bisherige Forschungslandschaft hauptsächlich darstellt, nicht aus. Belastungs- und Beanspruchungsuntersuchungen, die alle Ebenen der Psychophysiologie des Menschen betrachten, sind dringend erforderlich, um eine Minimierung der physischen und psychischen Mehrbelastung durch Assistenzsysteme sicherzustellen. Krüger (2018) und Aringer-Walch et al. (2018) machen deutlich, dass auch qualitative Untersuchungen zur Beurteilung der Mensch-System-Interaktion hilfreich sein können. Die Kombination qualitativer und quantitativer Methoden kann die Schwächen der jeweils anderen Seite reduzieren.

Problematisch ist hinsichtlich der Gestaltung von Normen und Richtlinien, dass die technologische Entwicklung zurzeit deutlich schneller verläuft als Standards zum Umgang mit den Systemen entwickelt werden können. Es besteht die Gefahr, dass die Praxis die Wissenschaft überholt und die Erforschung gesundheitlicher Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf den Menschen vernachlässigt wird. Es kann nur so vorgegangen werden, dass, wie in dieser

Arbeit, kontrolliert experimentiert wird, um aus diesen praktischen Erfahrungen heraus entsprechend gesetzlich zu regulieren.

Bei allen Digitalisierungsprozessen ist eine gezielte, interdisziplinäre Begleitung, Analyse und Bewertung der neuen digitalen Assistenzsysteme wichtig, um die Kompetenzen verschiedener Fachrichtungen zu bündeln und die Potenziale neuer Technologien zu erkennen, zu gestalten und zu nutzen. Betriebsmediziner und Arbeitsphysiologen dürfen nicht erst im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung einbezogen werden, sondern sollten früh am Entwicklungsprozess teilhaben, um potentielle Risiken neuer Verfahren und neuer Arbeitsmittel zu entdecken. Ebenso sind die frühzeitige Partizipation von Mitarbeitern (aus Betroffenen Beteiligte machen), eine gute Unternehmenskommunikation, gesunde Werte in der Organisation und gesunde Führung, Sinnhaftigkeit der Digitalisierung für das Unternehmen (Digitalisierung nicht als Selbstzweck) und die Einbeziehung externer Expertise Gelingensbedingungen für die Akzeptanz und den Erfolg von Digitalisierungsprozessen.

Der umfassende Wandel durch die fortschreitende Digitalisierung in der Arbeitswelt stellt nur dann eine Chance dar, wenn der Mensch und die betrieblichen Spielregeln beachtet werden. Dazu müssen sich Wissenschaft und Wirtschaft sowie Forschung und Entwicklung eng verzahnen, damit technologische Entwicklungen auch zu den betrieblichen Anforderungen passen. Interdisziplinäre Verbundprojekte, wie in diesem Fall das Projekt „3D-Montageassistent“, sind dafür gut geeignet.

5 Zusammenfassung

Vielfältige digitale Assistenzsysteme der Industrie 4.0 bieten technisch heute bereits diverse Anwendungsmöglichkeiten, um Mitarbeiter z. B. bei variantenreichen Montageprozessen zu unterstützen. Die vormals technologiedominierte Betrachtungsweise bei der Entwicklung digitaler Assistenzsysteme wird in den letzten Jahren allmählich durch humanzentrierte Gestaltungsansätze ergänzt, jedoch sind die bisherigen Erkenntnisse zu nutzerbezogenen Aspekten nicht ausreichend. Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung der Kenntnisse zu den gesundheitlichen Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf zukünftige Technologienutzer durch ein mehrstufiges exploratives Vorgehen. Das Studiendesign ist in Anlehnung an das Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg für psychophysiologische Untersuchungen konzipiert.

Zur Beantwortung der aufgestellten Fragestellungen und Hypothesen zur objektiven und subjektiven Beanspruchung, der objektiven Leistung und der Gebrauchstauglichkeit wird eine Vorstudie mit 24 Probanden (\bar{x} 25,2 \pm 5,65 Jahre) sowie ein virtueller User-Test mit 25 Probanden (\bar{x} 26,8 \pm 8,93 Jahre) und ein realer User-Test mit 11 Probanden (\bar{x} 26,2 \pm 3,82 Jahre) durchgeführt. Die drei Teilstudien sind aufeinander aufgebaut und orientieren sich an den realen Arbeitsbedingungen eines industriellen Arbeitsplatzes der Einzelmontage. Das Studiendesign aller drei Teilstudien greift etablierte, arbeitsphysiologische Methoden zur subjektiven und objektiven Bewertung der Beanspruchung auf. Dazu gehören validierte Fragebögen und die Herzfrequenzvariabilitätsanalyse. Eingesetzte Instrumente für die Erfassung nutzerbezogener Aspekte sind der NASA-Task Load Index, die Rating Scale Mental Effort, die Eigenzustandsskala, der Fragebogen zur visuellen Ermüdung, die System Usability Scale, der ISONORM-Fragebogen und Teilskalen des Technologie-Akzeptanz-Modells. Die erprobten quantitativen Methoden der Belastungs- und Beanspruchungsanalyse werden im realen User-Test an einem Modellarbeitsplatz durch qualitative Methoden wie Interviews und dem Lauten Denken ergänzt, um ein tieferes Verständnis über die Usability-Aspekte des entwickelten Assistenzsystems zu erlangen.

Obwohl in der Vorstudie und dem virtuellen User-Test vereinzelt Unterschiede in der Ausprägung der HRV-Parameter zu erkennen sind, kann bei keiner der drei durchgeführten Teilstudien eine erhebliche physiologische Beanspruchung und daraus folgend bei keiner dieser Anwendungen eine Mehrbelastung durch das digitale Assistenzsystem festgestellt werden. Somit wird die Arbeit mit diesen Assistenzsystemen in dem ausgewählten Anwendungsbereich im kurzfristigen Einsatz mit einem altersvergleichbaren Probandenkollektiv als vertretbar eingestuft.

Während sich die subjektive Beanspruchung, die Stimmungslage und die visuelle Ermüdung in der Vorstudie nicht zwischen der Arbeit mit der Papierliste und der digitalen Liste unterscheidet, zeigt sich im virtuellen User-Test eine signifikant stärker erlebte geistige Anstrengung bei der Verwendung der Augmented Reality (AR)-Konturen als bei dem Pick-to-Light System. Die subjektiv eingeschätzte geistige Anstrengung bei dem virtuellen und realen User-Test ist vergleichbar.

Die objektive Leistung differiert sowohl in der Vorstudie als auch im virtuellen User-Test nicht signifikant zwischen den dargebotenen Assistenzvarianten. Jedoch zeigt sich im virtuellen User-Test in der Montage des ersten Wegeventils ein statistisch sicherer Einfluss durch die Art des vorausgegangenen Trainings, bei der die Probanden, die das Desktoptraining absolvierten, eine bessere Leistung erbrachten als die Trainingsfilm-Gruppe.

In der Vorstudie wird die Gebrauchstauglichkeit der Papier- und digitalen Liste ähnlich gut bewertet, wobei 46 % der Probanden die digitale Liste und 33 % die Papierliste favorisieren. Eine ähnlich gute Usability-Bewertung erfolgt im virtuellen User-Test, jedoch teils mit einer signifikant besseren Bewertung des Pick-to-Light-Systems gegenüber den AR-Konturen. Auch wird das Pick-to-Light-System verglichen mit den AR-Konturen von den Probanden für einen zukünftigen Durchlauf favorisiert (56 % vs. 20 %). Die Komponenten des Assistenzsystems, insbesondere die AR-Konturen, im realen User-Test werden qualitativ gut durch die Probanden bewertet. Der reale User-Test zeigt jedoch auch Verbesserungsmöglichkeiten (z. B. hinsichtlich Informationsfülle und Farbgestaltung) auf, die mit den Beteiligten der technologischen Entwicklung diskutiert wurden. Partiiell können Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Ebenen des Fahrenberg'schen Modells in den drei Teilstudien beschrieben werden.

Die ermittelten Ergebnisse sind begrenzt auf andere Nutzergruppen, Anwendungskontexte und Assistenzsysteme übertragbar. Insbesondere längsschnittlich konzipierte Feldstudien unter Berücksichtigung der aktuellen technischen Entwicklung, die die gesundheitlichen Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf Beschäftigte betrachten, stellen weiterhin eine große Forschungslücke dar. Diese kann nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit human- und ingenieurwissenschaftlicher Fachrichtungen geschlossen werden. Schlüsselfaktoren wie Nutzerzentrierung, die frühzeitige Partizipation zukünftiger Anwender in die Entwicklung und Implementierung, die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Assistenzsysteme sowie ihre Schädigungslosigkeit werden zukünftig über den Erfolg digitaler Assistenten in der manuellen Montage entscheiden.

Literaturverzeichnis

1. Abele ND, Kluth K (2020) Beanspruchungsbezogene Evaluierung AR-basierter versus papierunterstützter Rüstinstruktionen zur Einrichtung von Industriemaschinen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.) Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? 1–6, Dortmund.
2. Adler S, Mönch T, Mecke R, Preim B, Wex C (2010) Methoden für die patienten- und krankheitsfallspezifische Simulation minimal-invasiver Interventionen an der Leber. In: Burgert O (Hrsg.) Chirurgische Interventionen: vom Neanderthaler zur Roboterassistenz 215–220. Der Andere Verlag, Tönning.
3. Amrhein V, Greenland S, McShane B (2019) Scientists rise up against statistical significance. *Nature* 567 (7748): 305–307.
4. Apt W, Bovenschulte M, Priesack K, Weiß C, Hartmann EA (2018) Forschungsbericht 502 - Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb, Berlin.
5. Aringer-Walch C, Besserer S, Pokorni B (2018) Nutzerbedürfnisse an ein digitales Assistenzsystem im Kontext der Industrie 4.0. Eine explorative Studie im Bereich der Montage. In: Weidner R, Karafillidis A (Hrsg.) Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Dritte transdisziplinäre Konferenz 139–150. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
6. Arlinghaus J, Antons O (2020) Management für Digitalisierung und Industrie 4.0. In: Frenz W (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft 1121–1145. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
7. Arsintescu L, Chachad RG, Gregory KB, Mulligan JB, Flynn-Evans EE (2019) The Relationship between Workload, Performance and Fatigue in a Short-Haul Airline, Coeur d'Alene, Idaho, United States.
8. Bächler A, Bächler L, Autenrieth S, Kurtz P, Hoerz T, Heidenreich T, Kruell G (2016) A Comparative Study of an Assistance System for Manual Order Picking - Called Pick-by-Projection - with the Guiding Systems Pick-by-Paper, Pick-by-Light and Pick-by-Display. In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 523–531. IEEE.
9. Bangor A, Kortum PT, Miller JT (2008) An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction* 24 (6): 574–594.
10. Bangor AW (2000) Display Technology and Ambient Illumination Influences on Visual Fatigue at VDT Workstations. Dissertation, Blacksburg, Virginia.
11. Bangor AW, Kortum PT, Miller JT (2009) Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. *Journal of Usability Studies* 4 (3): 114–123.
12. Bannat A (2014) Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion. Dissertation, München.
13. Bergstrom JR, Schall AJ (2014) Eye tracking in user experience design. Elsevier, Amsterdam.
14. Berntson GG, Bigger JT, Eckberg DL, Grossman P, Kaufmann PG, Malik M, Nagaraja HN, Porges SW, Saul JP, Stone PH, van der Molen MW (1997) Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology* 34 (6): 623–648.
15. Billman GE (2013) The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Frontiers in physiology* 4 (26): 1–5.
16. Blattgerste J, Strenge B, Renner P, Pfeiffer T, Essig K (2017) Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks. In: Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments 75–82. ACM, New York, NY, USA.
17. Böckelmann I (2012) Analyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV) - praktische Relevanz. *Zbl Arbeitsmed* 62 (5): 275–279.

18. Böckelmann I (2016) Teilvorhaben Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz im Verbundvorhaben Verbundvorhabenbeschreibung 3D-basierte Assistenztechnologien für variantenreiche Montageprozesse - Menschzentrierter Arbeitsplatz der Zukunft ("3D-Montageassistent") [internes Dokument].
19. Böckelmann I (2018) Auswirkungen neuer Arbeitswelten auf die Menschen. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* (5): 308–310.
20. Böckelmann I, Chegrynets O, Mecke R, Darius S, Sánchez Márquez JS (2015) Aufmerksamkeitsleistung und objektive Beanspruchung beim Einsatz von zwei verschiedenen Head-mounted-Displays. *Zbl Arbeitsmed* 65 (1): 12–20.
21. Böckelmann I, Minow A (2018) Nutzung digitaler Assistenzsysteme. Sicherheits- und Gesundheitsaspekte beim Einsatz neuer Technologien. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* (11): 702–707.
22. Böckelmann I, Minow A, Bergmüller A, Mewes E, Darius S, Mecke R (2019) Die Rolle und Einordnung digitaler Assistenzsysteme in der Arbeit 4.0. In: Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (Hrsg.) Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM) 47–49.
23. Böckelmann I, Sammito S (2016) Herzfrequenzvariabilität. In: Letzel S, Nowak D (Hrsg.) *Handbuch der Arbeitsmedizin. Arbeitsphysiologie, Arbeitspsychologie, klinische Arbeitsmedizin, Prävention und Gesundheitsförderung* 1–32. 41. Ergänzungslieferung Ecomed, Landsberg/Lech.
24. Böckelmann I, Seibt R (2011) Methoden zur Indikation vorwiegend psychischer Berufsbelastung und Beanspruchung - Möglichkeiten für die betriebliche Praxis. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 65 (3): 205–221.
25. Bonin H, Gregory T, Ziehran U (2015) Übertragung der Studie von Frey/Osborne (2013) auf Deutschland: Endbericht: Kurzexpertise Nr. 57, Mannheim.
26. Bosch T, Könemann R, Cock H de, van Rhijn G (2017) The effects of projected versus display instructions on productivity, quality and workload in a simulated assembly task. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* 412–415. ACM, New York, NY, USA.
27. Boucsein W (1991) Arbeitspsychologische Beanspruchungsforschung heute - eine Herausforderung an die Psychophysiologie. *Psychol Rundschau* 42 (3): 129–144.
28. Brauer RR, Fischer NM, Grande G (2015) Akzeptanzorientierte Technikentwicklung. In: Weidner R, Redlich T, Wulfsberg JP (Hrsg.) *Technische Unterstützungssysteme* 140–146. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
29. Braun H, Ullmann C, Duthweiler M, Schulze H (2005) Gestaltung von Augmented Reality Applikationen für Kommissionieraufgaben. In: Urbas L, Steffens C (Hrsg.) *Zustandserkennung und Systemgestaltung*. 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, 13. bis 15. Oktober 2005 83–88. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
30. Brooke J (1986) SUS: a "quick and dirty" usability scale. In: Jordan PW, Thomas B, Weerdmeester BA, McClelland AL (Hrsg.) *Usability Evaluation in Industry* 189–194. Taylor and Francis, London.
31. Brunner M, Matzel K, Aladashvili A, Krautz C, Grützmann R, Croner R (2019) Implementierung eines Roboterprogramms in der Viszeralchirurgie – Erfahrungen eines deutschen Zentrums. *Zentralblatt für Chirurgie* 144 (3): 224–234.
32. Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz (2017) *Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 1 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist. ArbStättV.*
33. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2016) *Weissbuch - Arbeiten 4.0*, Berlin.

34. Büttner S, Funk M, Sand O, Röcker C (2016) Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems. In: Unknown (Hrsg.) PETRA 2016. The 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments : conference program : June 29 - July 1, 2016, Corfu, Greece 1–8. ACM - Association for Computing Machinery, New York, New York.
35. Chin J, Diehl V, Norman K (1988) Development of an instrument measuring user satisfaction of the human-computer interface. In: CHI' 88 Conference Proceedings (Hrsg.) Human Factors in Computing Systems 213–218. ACM Press, New York, New York.
36. Croner RS (2018) Robotic complete mesocolic excision in right hemicolectomy - a video vignette. *Colorectal disease: the official journal of the Association of Coloproctology of Great Britain and Ireland* 20 (7): 648–649.
37. Darius S, Sánchez Márquez JS, Chegrynets O, Mecke R, Böckelmann I (2015) Untersuchungen zum Gesichtsfeld bei der Nutzung verschiedener Head-Mounted-Displays. *Zbl Arbeitsmed* 65 (4): 203–209.
38. Davis FD (1986) A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems: Theory and Results. Doctoral dissertation.
39. Davis FD (1989) Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly* 13 (3): 319–340.
40. Deterding S, Dixon D, Khaled R, Nacke L (2011) From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification". In: Lugmayr A, Franssila H, Safran C, Hammouda I (Hrsg.) Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference on Envisioning Future Media Environments - MindTrek '11 9. ACM Press, New York, New York, USA.
41. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (2016) DGUV Information 215-450. Softwareergonomie, Berlin.
42. Dey A, Billinghurst M, Lindeman RW, Swan JE (2018) A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies. 2005 to 2014. *Front. Robot. AI* 5: 161.
43. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2000) Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 2: Gestaltungsgrundsätze (EN ISO 10075-2:2000).
44. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2008) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006).
45. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2011a) Ergonomie - Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte (ISO 26800:2011).
46. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2011b) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion (ISO 9241-910:2011).
47. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016a) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 920: Anleitung zu taktilen und haptischen Interaktionen (ISO 9241-920:2009).
48. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016b) Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2016).
49. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung (ISO 9241-112:2017).
50. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2018a) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 125: Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung (ISO 9241-125:2017).
51. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2018b) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO 9241-11:2018).
52. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2019) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 126: Empfehlungen zur auditiven Informationsdarstellung.

53. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2020a) Grundsätze der ergonomischen Gestaltung assistiver Systeme (DIN 92419:2020).
54. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2020b) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2019).
55. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2020c) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Interaktionsprinzipien (ISO 9241-110:2020).
56. Drosdowski (Hrsg. 1997) Duden, Etymologie. Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache. Dudenverl., Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich.
57. Drössler S, Steputat A, Schubert M, Günther N, Staudte R, Kofahl M, Hegewald J, Seidler A (2018) Informationsüberflutung durch digitale Medien am Arbeitsplatz. *Zbl Arbeitsmed* 68 (2): 77–88.
58. Dzida W, Hofmann B, Freitag R (2000) Gebrauchstauglichkeit von Software. *Ergonorm: Ein Verfahren zur Konformitätsprüfung von Software auf der Grundlage von DIN EN ISO 9241 Teile 10 und 11*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund.
59. Eason KD (1976) Understanding the naive computer user. *The Computer Journal* 19 (1): 3–7.
60. Eilers K, Nachreiner F, Böning E (1990) Zur subjektiven Skalierung psychischer Beanspruchung - Teil 2: Überprüfung der Validität verankerter Relativurteile in einer Felduntersuchung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 44: 24–29.
61. Eilers K, Nachreiner F, Hänecke K (1986) Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 40 (4): 125–224.
62. Eller-Berndl D (2015) *Herzratenvariabilität*. 2. Auflage Verlagshaus der Ärzte, Wien.
63. Engel B (2019) Immersion oder Versinken in der virtuellen Realität - auch ein Thema für die Arbeitsmedizin? *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* (54): 600–603.
64. Ericsson KA, Simon HA (1980) Verbal reports as data. *Psychological Review* (87): 215–251.
65. Ericsson KA, Simon HA (1993) *Protocol Analysis: Verbal reports as data*. MIT Press, Cambridge.
66. ESC, NASPE (1996) Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation* 93 (5): 1043–1065.
67. Fahrenberg J (1969) Die Bedeutung individueller Unterschiede für die Methodik der Aktivierungsforschung. In: Schönplflug W (Hrsg.) *Methoden der Aktivierungsforschung* 95–122. Huber, Bern.
68. Fjeld M, Schar SG, Signorello D, Krueger H (2002) Alternative tools for tangible interaction: a usability evaluation. In: *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality* 157–318. IEEE Comput. Soc.
69. Frey CG, Osborne MA (2013) The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation. *Technological Forecasting and Social Change* (114): 254–280.
70. Frøkjær E, Hertzum M, Hornbæk K (2000) Measuring Usability: Are Effectiveness, Efficiency, and Satisfaction Really Correlated? In: Turner T, Szwillus G (Hrsg.) *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '00* 345–352. ACM Press, New York, New York, USA.
71. Funk M, Bächler A, Bächler L, Kosch T, Heidenreich T, Schmidt A (2017) Working with Augmented Reality? A Long-Term Analysis of In-Situ Instructions at the Assembly Workplace. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* 222–229. ACM, New York, NY, USA.

72. Funk M, Hartwig M, Backhaus N, Knittel M, Deuse J (2018) Nutzerevaluation von Assistenzsystemen für die industrielle Montage. In: Weidner R, Karafillidis A (Hrsg.) Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Dritte transdisziplinäre Konferenz 213–221. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
73. Funk M, Heusler J, Akcay E, Weiland K, Schmidt A (2016) Haptic, Auditory, or Visual? In: Unknown (Hrsg.) Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments - PETRA '16 1–6. ACM Press, New York, New York, USA.
74. Funk M, Shirazi AS, Mayer S, Lischke L, Schmidt A (2015) Pick from here! In: Mase K, Langheinrich M, Gatica-Perez D, Gellersen H, Choudhury T, Yatani K (Hrsg.) Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing - UbiComp '15 601–609. ACM Press, New York, New York, USA.
75. Funke J, Spering M (2006) Methoden der Denk- und Problemlöseforschung. In: Funke J (Hrsg.) Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C: Theorie und Forschung: Denken und Problemlösen 647–744. Hogrefe, Göttingen.
76. Gao Y, Liu Y, Normand J-M, Moreau G, Gao X, Wang Y (2019) A study on differences in human perception between a real and an AR scene viewed in an OST-HMD. *J Soc Inf Display* 27 (3): 155–171.
77. Gebauer N (2017) Auswirkungen des Einsatzes von Gamification in einer Datenbrillen-unterstützten Kommissionierung auf Mitarbeiter und Prozess. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.) Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels - kreativ, innovativ, sinnhaft 112–117, Dortmund.
78. Gediga G, Hamborg KC (1999) IsoMetrics: Ein Verfahren zur Evaluation von Software nach ISO 9241/10. In: Holling H, Gediga G (Hrsg.) Evaluationsforschung 195–234. Hogrefe, Göttingen.
79. Gerpott TJ, Kurt A (2020) Verbessert ein Pick-by-Watch-System Kommissionierungsleistungen gegenüber herkömmlichen Papierlisten? *Z. Arb. Wiss.* 38 (6): 235.
80. Ghanbary Sartang A, Ashnagar M, Habibi E, Sadeghi S (2016) Evaluation of Rating Scale Mental Effort (RSME) effectiveness for mental workload assessment in nurses. *JOHE* 5 (4): 211–217.
81. Gräßler I, Roesmann D, Pottebaum J (2020) Traceable learning effects by use of digital adaptive assistance in production. *Procedia Manufacturing* 45: 479–484.
82. Grier RA (2015) How High is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 59 (1): 1727–1731.
83. Grubert J, Hamacher D, Mecke R, Böckelmann I, Schega L, Huckauf A, Urbina M, Schenk M, Doil F, Tümler J (2010) Extended investigations of user-related issues in mobile industrial AR. In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 229–230. IEEE.
84. Guo A, Starner T, Raghu S, Xie X, Ismail S, Luo X, Simoneau J, Gilliland S, Baumann H, Southern C (2014) A comparison of order picking assisted by head-up display (HUD), cart-mounted display (CMD), light, and paper pick list. In: Dunne L, Martin T, Beigl M (Hrsg.) Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers - ISWC '14 71–78. ACM Press, New York, New York, USA.
85. Haase M (2018) Einfluss von Nutzermerkmalen auf die Mensch-Computer-Interaktion während kritischer Interaktionssequenzen. Dissertation, Magdeburg.
86. Hambling B, van Goethem P (2013) User acceptance testing. A step-by-step guide. BCS, Swindon, U.K.
87. Hart SG (2006) NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (9): 904–908.

88. Hart SG, Staveland L (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock P, Meshkati N (Hrsg.) Human Mental Workload 139–183. North Holland, Amsterdam.
89. Hasselmann O, Meyn C, Schröder J, Sareika C (2018) Gesundheit in der Arbeitswelt 4.0. In: Cernavin O, Schröter W, Stowasser S (Hrsg.) Prävention 4.0. Analysen und Handlungsempfehlungen für eine produktive und gesunde Arbeit 4.0 231–268. Springer, Wiesbaden.
90. Hassenzahl M, Burmester M, Koller F (2003) AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In: Ziegler J, Szwillus G (Hrsg.) Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung 187–196. B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig.
91. Hassler M, Rau R, Hupfeld J, Paridon H (2016) Auswirkungen von ständiger Erreichbarkeit und Präventionsmöglichkeiten - Teil 2: Eine wissenschaftliche Untersuchung zu potenziellen Folgen für Erholung und Gesundheit und Gestaltungsvorschläge für Unternehmen, Berlin.
92. Heine L, Schramm K (2007) Lautes Denken in der Fremdsprachenforschung: Eine Handreichung für die empirische Praxis. In: Vollmer HJ (Hrsg.) Synergieeffekte in der Fremdsprachenforschung. Empirische Zugänge, Probleme, Ergebnisse 167–206. Peter Lang, Frankfurt am Main.
93. Helfferich C (2011) Die Qualität qualitativer Daten. Manual für die Durchführung qualitativer Interviews. 4. überarbeitete Auflage VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
94. Henderson SJ, Feiner SK (2011) Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task. In: 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 191–200. IEEE.
95. Heponiemi T, Hyppönen H, Vehko T, Kujala S, Aalto A-M, Vänskä J, Elovainio M (2017) Finnish physicians' stress related to information systems keeps increasing: a longitudinal three-wave survey study. BMC medical informatics and decision making 17 (1): 147.
96. Höffler TN, Leutner D (2007) Instructional animation versus static pictures: A meta-analysis. Learning and Instruction 17 (6): 722–738.
97. Hohmann A, Lames M, Letzelter M (2007) Einführung in die Trainingswissenschaft. 4., überarb. u. erw. Aufl. Limpert, Wiebelsheim.
98. Höhn K, Jandová A, Paritschkow S, Schmauder M (2016) Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt. Mensch-Rechner-Interaktion. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Berlin, Dresden.
99. Hoos O (2006) Spektralanalyse der Herzfrequenzvariabilität im Sport – Methoden und Anwendungen, Möglichkeiten und Grenzen. In: Hottenrott K (Hrsg.) Herzfrequenzvariabilität: Methoden und Anwendungen in Sport und Medizin. Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaften 28–63. Feldhaus Ed., Czwalina, Hamburg.
100. Hornbæk K, Law EL-C (2007) Meta-analysis of correlations among usability measures. In: Rosson MB, Gilmore D (Hrsg.) Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '07 617–626. ACM Press, New York, New York, USA.
101. Hou L, Wang X, Bernold L, Love PED (2013) Using Animated Augmented Reality to Cognitively Guide Assembly. J. Comput. Civ. Eng. 27 (5): 439–451.
102. Jacobi F, Linden M (2018) Macht die moderne Arbeitswelt psychisch krank – oder kommen psychisch Kranke in der modernen Arbeitswelt nicht mehr mit? Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed 53 (8): 530–536.
103. Jeschke P, Lafrenz B, Wischniewski S (2016) Vergleich subjektiver und objektiver Beanspruchungsmessung bei dual-2-back-Aufgaben. Z. Arb. Wiss. 70 (4): 211–219.
104. Jeske T, Garrel J von, Starke J (2011) Erfolgsfaktor Flexibilität - Ergebnisse einer deutschlandweiten Unternehmensbefragung. Indus Eng 64 (1): 20–23.

105. Jeske T, Meyer F, Schlick CM (2014) Einfluss der Gestaltung von Arbeitsplänen auf die Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 68 (1): 1–6.
106. Junghanns G, Kersten N (2020) Informationsüberflutung am Arbeitsplatz. *Zbl Arbeitsmed* 70 (1): 8–17.
107. Kallmeyer W, Schütze F (1976) Konversationsanalyse. *Studium Linguistik* 1: 1–28.
108. Kampmeier J, Cucera A, Fritzsche L, Brau H, Duthweiler M, Lang GK (2007) Eignung monokularer "Augmented Reality" - Technologien in der Automobilproduktion. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 224 (7): 590–596.
109. Karapanos M, Becker C, Christophel E (2018) Die Bedeutung der Usability für das Lernen mit digitalen Medien. *MedienPädagogik 2018 (Occasional Papers)*: 36–57.
110. Kardys C, Walle O (2018) Digitalisierung - Fluch oder Segen in der Arbeitswelt 4.0. In: Matusiewicz D, Nürnberg V, Nobis S (Hrsg.) *Gesundheit und Arbeit 4.0. Wenn Digitalisierung auf Mitarbeitergesundheit trifft* 29–41. medhochzwei, Heidelberg.
111. Kasselmann S, Willeke S (2018) *Technologie-Kompodium: Interaktive Assistenzsysteme*.
112. Kellmann M, Golenia M (2003) Skalen zur Erfassung der aktuellen Befindlichkeit im Sport. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 54 (11): 329–330.
113. Kim S, Nussbaum MA, Gabbard JL (2019) Influences of augmented reality head-worn display type and user interface design on performance and usability in simulated warehouse order picking. *Applied ergonomics* 74: 186–193.
114. Kim Y-J, Lee EC (2011) EEG Based Comparative Measurement of Visual Fatigue Caused by 2D and 3D Displays. In: Stephanidis C (Hrsg.) *HCI International 2011 – Posters' Extended Abstracts* 289–292. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
115. King WR, He J (2006) A meta-analysis of the technology acceptance model. *Information & Management* 43 (6): 740–755.
116. Kirakowski J (1996) The Software Usability Measurement Inventory: Background and Usage. In: Jordan PW, Thomas B, Weerdmeester BA, McClelland IL (Hrsg.) *Usability Evaluation in Industry* 169–177. Taylor & Francis, Brighton.
117. Kirchhoff B, Wischniewski S, Adolph L (2017) *Head Mounted Displays - Arbeitshilfen der Zukunft. Bedingungen für den sicheren und ergonomischen Einsatz monokularer Systeme*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund.
118. Kleineberg T, Eichelberg M, Hinrichsen S (2017) Participative Development of an Implementation Process for Worker Assistance Systems. In: Villmer FJ, Padoano E (Hrsg.) *Production Engineering and Management. Proceedings 7th International Conference*. 25–36. Publication Series in Direct Digital Manufacturing, Lemgo.
119. Knorr P, Schramm K (2012) Datenerhebung durch Lautes Denken und Lautes Erinnern in der fremdsprachendidaktischen Empirie. In: Doff S (Hrsg.) *Fremdsprachenunterricht empirisch erforschen. Grundlagen, Methoden, Anwendung* 184–201. Narr, Tübingen.
120. Kohte W (2018) Große Auswirkungen der Digitalisierung auf die Arbeitswelt. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 53 (6): 357–359.
121. Kollmann T (1988) *Die Akzeptanz innovativer Nutzungsgüter und -systeme: Konsequenzen für die Einführung von Telekommunikations- und Multimediasystemen*. Gabler Verlag, Wiesbaden.
122. Konrad K (2010) Lautes Denken. In: Mey G, Mruck K (Hrsg.) *Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie* 476–490. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
123. Kretschmer V, Schmidt M, Schwede C, Schäfer S, Müller G (2018) Spielerisch zum Trainingserfolg: Evaluationsstudie eines PC-basierten Serious Games für die Verpackungslogistik bei DB Schenker. *Logistics Journal: Proceedings*: 1–8.

124. Kretschmer V, Spee D (Hrsg. 2018) Kognitive Ergonomie. Der Mensch - eingebunden in die Logistik 4.0. huss, München.
125. Kretschmer V, Terharen A (2019) Serious Games in Virtual Environments: Cognitive Ergonomic Trainings for Workplaces in Intralogistics. In: Ahram TZ (Hrsg.) Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design 266–274. Springer International Publishing, Cham.
126. Krüger J (2018) Subjektives Nutzererleben in der Mensch-Computer-Interaktion. Beziehungsrelevante Zuschreibungen gegenüber Companion-Systemen am Beispiel eines Individualisierungsdialogs. Verlag Barbara Budrich, Opladen, Berlin, Toronto.
127. Kujala S (2003) User involvement: A review of the benefits and challenges. Behaviour & Information Technology 22 (1): 1–16.
128. Kunze S (2017) Bosch Rexroth stellt Assistenzsystem Active-Assist für manuellen Arbeitsplatz vor. <https://www.elektrotechnik.vogel.de/bosch-rexroth-stellt-assistenzsystem-active-assist-fuer-manuellen-arbeitsplatz-vor-a-653695/> (17.06.2020).
129. Laugwitz B, Schrepp M, Held T (2006) Konstruktion eines Fragebogens zur Messung der User Experience von Softwareprodukten. In: Heinecke AM, Paul H (Hrsg.) Mensch & Computer 2006 - Mensch und Computer im Strukturwandel 125–134. Oldenbourg, München.
130. Leso V, Fontana L, Iavicoli I (2018) The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. La Medicina del lavoro 110 (5): 327–338.
131. Lewis JR (1992) Psychometric Evaluation of the Post-Study System Usability Questionnaire: The PSSUQ. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 36 (16): 1259–1260.
132. Lichtblau K, Fritsch M, Millak A (2018) Digital-Atlas Deutschland. Überblick über die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft sowie KMU, NGOs, Bildungseinrichtungen sowie der Zukunft der Arbeit in Deutschland, Köln.
133. Lin T, Omata M, Hu W, Imamiya A (2005) Do physiological data relate to traditional usability indexes? In: ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction (Hrsg.) Proceedings of the 2005 Australasian Computer-Human Interaction Conference 1–10. IEEE Computer Society, Washington, DC.
134. Lohninger A (2017) Herzratenvariabilität. Das HRV-Praxis-Lehrbuch. facultas, Wien.
135. Longo L (2018) Experienced mental workload, perception of usability, their interaction and impact on task performance. PloS one 13 (8): 1-36.
136. Longo L, Dondio P (2015) On the Relationship between Perception of Usability and Subjective Mental Workload of Web Interfaces. In: 2015 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT) 345–352. IEEE.
137. Luczak H, Rohmert W (1976) Anpassungsreaktionen von Arbeitspersonen bei ergonomischen Feldstudien informatorischer Arbeitsinhalte. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology 35 (1): 33–47.
138. Maes P (1994) Agents that reduce work and information overload. Commun. ACM 37 (7): 30–40.
139. Malińska M, Zużewicz K, Bugajska J, Grabowski A (2015) Heart rate variability (HRV) during virtual reality immersion. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 21 (1): 47–54.
140. Mayring P (2015) Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 12. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage Beltz, Weinheim.
141. Mazur LM, Mosaly PR, Moore C, Marks L (2019) Association of the Usability of Electronic Health Records With Cognitive Workload and Performance Levels Among Physicians. JAMA network open 2 (4): e191709.

142. Menn JP (2019) Lernerzentrierte digitale Werkzeuge zur Montagetrainingsunterstützung am Beispiel des Sondermaschinenbaus. Dissertation, Berlin.
143. Merkel L, Schultz C, Braunreuther S, Reinhart G (2016) Digitale Assistenzsysteme in der Kommissionierung. ZWF 111 (11): 687–690.
144. Michas IC, Berry DC (2000) Learning a procedural task: effectiveness of multimedia presentations. Appl. Cognit. Psychol. 14 (6): 555–575.
145. Milgram P, Colquhoun H (1999) A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In: Ohta Y, Tamura H (Hrsg.) Mixed Reality 5–30. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
146. Milgram P, Takemura H, Utsumi A, Kishino F (1995) Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In: SPIE Proceedings (Hrsg.) The International Society for Optical Engineering 2351 282–292. SPIE.
147. Miller GA (1956) The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. Psychological Review 63 (2): 81–97.
148. Minow A (2017) Ständige Erreichbarkeit als psychischer Belastungsfaktor bei Führungskräften der Caritas-Trägergesellschaft St. Mauritius gGmbH. Masterarbeit, Magdeburg.
149. Minow A, Böckelmann I (2018a) Beanspruchungsindikatoren mit neuen digitalen Assistenztechnologien - Wie smarte Arbeit 4.0 gelingt. In: Kretschmer V, Spee D (Hrsg.) Kognitive Ergonomie. Der Mensch - eingebunden in die Logistik 4.0 106–113. huss, München.
150. Minow A, Böckelmann I (2018b) Nutzerbezogene Aspekte beim Einsatz von digitalen Assistenztechnologien im Montagebereich - ein systematischer Review. In: Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (Hrsg.) Tagungsband zur 58. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM) 91–92.
151. Minow A, Böckelmann I (2019) Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme: Was haben wir und was fehlt uns? In: Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (Hrsg.) Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM) 367 - 369.
152. Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2020) Gebrauchstaugliche Assistenzsysteme in der manuellen Montage – ein Vergleich von Pick-to-Light und AR-Konturen mittels VR-Simulation. Z. Arb. Wiss. 24 (1): 1.
153. Minow A, Swart E (2019) Arbeitsbezogene erweiterte Erreichbarkeit. Zbl Arbeitsmed 69 (1): 11–15.
154. Misoch S (2015) Qualitative Interviews. De Gruyter, Berlin, München, Boston.
155. Moise A (2006) Designing better user interfaces for radiology interpretation. Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa.
156. Müller R, Müller-Polyzou R, Hörauf L, Bashir A, Karkowski M, Vesper D, Gärtner S (2018) Intuitive Bedienung laserbasierter Montageassistenten. ZWF 113 (6): 363–368.
157. Müller-Böling D, Müller M (1986) Akzeptanzfaktoren der Bürokommunikation. R. Oldenbourg Verlag, München.
158. Murauer N, Huber T (2018) Simulationsstudie zur Erfüllung psychologischer Grundbedürfnisse durch Gamification in der Datenbrillen-unterstützten Kommissionierung. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.) ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(f)T - Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung 106–111, Dortmund.
159. Nahles A, Hofmann J (2017) Handlungsempfehlungen der Plattform „Digitale Arbeitswelt“ für gesunde Arbeit, gute Arbeitsgestaltung und berufliche Teilhabe.

160. Neerincx MA, Griffioen E (1996) Cognitive task analysis: harmonizing tasks to human capacities. *Ergonomics* 39 (4): 543–561.
161. Nielsen J (1993) *Usability engineering*. Academic Press, Boston.
162. Nielsen J (1997) *Usability testing*. In: Salvendy G (Hrsg.) *Handbook of Human Factors and Ergonomics* 1543–1568. 2. Auflage John Wiley & Sons, New York.
163. Nielsen J, Levy J (1994) Measuring usability: preference vs. performance. *Commun. ACM* 37 (4): 66–75.
164. Nielsen J, Pernice K (2010) *Eyetracking web usability. Description based on print version record. Includes index*. New Riders, Berkeley, Calif.
165. Nitsch JR (1976) Die Eigenzustandsskala (EZ-Skala) - Ein Verfahren zur hierarchisch-mehrdimensionalen Befindlichkeitsskalierung. In: Nitsch JR, Udris I (Hrsg.) *Beanspruchung im Sport. Beiträge zur psychologischen Analyse sportlicher Leistungssituation* 81–102. 1. Aufl. Limpert-Verlag, Bad Homburg.
166. Oehme O (2004) *Ergonomische Untersuchung von kopfbasierten Displays für Anwendungen der erweiterten Realität in Produktion und Service*. Shaker, Aachen.
167. Oehme O, Wiedenmaier S, Schmidt L (2002) Evaluation eines Augmented Reality User Interfaces für ein binokulares Video See-Through Head Mounted Display. In: VDI Verlag (Hrsg.) 35–40, Düsseldorf.
168. Pangert B, Pauls N, Schüpbach H (2016) Die Auswirkungen arbeitsbezogener erweiterter Erreichbarkeit auf Life-Domain-Balance und Gesundheit. *Forschung Projekt F 2353*. 2. vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Berlin, Dresden.
169. Pataki K, Sachse K, Prümper J, Thüring M (2006) ISONORM 9241/110-Short: Kurzfragebogen zur Software-Evaluation. In: Lösel F (Hrsg.) *Berichte über den 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. 258–259. Pabst Science Publishers, Lengerich.
170. Pfendler C, Widdel H, Schlick C (2005) Bewertung eines Head-Mounted- und eines Hand-Held Displays bei einer Zielerkennungsaufgabe. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 59: 13–21.
171. Pfister E, Böckelmann I, Seibt R, Stoll R, Weippert M (2007) Arbeitsmedizinische Bedeutung der Herzfrequenzvariabilität. *Zbl Arbeitsmed* 57 (6): 158–166.
172. Pringle A, Campbell AG, Hutka S, Torrasso A, Couper C, Strunden F, Bajana J, Jastzab K, Croly R, Quigley R, McKiernan R, Sweeney P, Keane MT (2018) Using an Industry-Ready AR HMD on a Real Maintenance Task: AR Benefits Performance on Certain Task Steps More Than Others. In: *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* 236–241. IEEE.
173. Prümper J (1997) Der Benutzerfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Reliabilität und Validität. In: Liskowsky R, Velichkovsky BM, Wüschmann W (Hrsg.) *Software-Ergonomie '97 - Usability Engineering: Interaktion von Mensch-Computer-Interaktion und Software-Entwicklung* 253–262. Teubner, Stuttgart.
174. Prümper J, Anft M (1993) Die Evaluation von Software auf Grundlage des Entwurfs zur internationalen Ergonomie-Norm ISO 9241 Teil 10 als Beitrag zur partizipativen Systemgestaltung – ein Fallbeispiel. In: Rödiger K (Hrsg.) *Software-Ergonomie '93 – Von der Benutzungsoberfläche zur Arbeitsgestaltung* 145–156. Teubner, Stuttgart.
175. Rennert D, Kliner K, Richter M (2019) Arbeitsunfähigkeit. In: Knieps F, Pfaff H (Hrsg.) *Psychische Gesundheit und Arbeit - Zahlen, Daten, Fakten mit Gastbeiträgen aus Wissenschaft, Politik und Praxis*. BKK Gesundheitsreport 2019 55–150, Berlin.
176. Rieder R, Kristensen CH, Pinho MS (2017) Quality Assessment of Interaction Techniques in Immersive Virtual Environments Using Physiological Measures. In: *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)* 109–117. IEEE.

177. Rinkenauer G (2020) World Usability Day 2019 im Ruhrgebiet. <https://www.ifado.de/2019/11/12/world-usability-day-2019-ruhrgebiet/> (28.02.2020).
178. Robelski S (2016) Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt. Mensch-Maschine-Interaktion. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
179. Roggentin A (2009) Arbeitsphysiologische Beanspruchungsanalyse beim Einsatz von Mobilien Augmented-Reality-Systemen. Dissertation, Magdeburg.
180. Rohmert W, Rutenfranz J (1983) Praktische Arbeitsphysiologie. 3. Auflage Thieme, Stuttgart, New York.
181. Rosenfield M (2016) Computer vision syndrome (a.k.a. digital eye strain). *Optometry in Practice* 17 (1): 1–10.
182. Rundnagel R (2017) Pyramide des Arbeitsschutzrechts. http://www.bagm.de/download/Uebersicht_Arbeitsschutzrecht.pdf (13.12.2020).
183. Sammito S, Böckelmann I (2015) Analyse der Herzfrequenzvariabilität. *Mathematische Basis und praktische Anwendung. Herz (Supplement 1)*: 76–84.
184. Sammito S, Böckelmann I (2016) Factors influencing heart rate variability. *ICFJ* 6: 18–22.
185. Sammito S, Thielmann B, Seibt R, Klussmann A, Weippert M, Böckelmann I (2015) Guideline for the application of heart rate and heart rate variability in occupational medicine and occupational science. *ASUI* 2015 (06): 1–29.
186. Sammito S, Thielmann B, Seibt R, Klussmann A, Weippert M, Böckelmann I (2016) AWMF Leitlinie: Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 51 (2): 123–141.
187. Sauro J (2011) A practical guide to the system usability scale. Background, benchmarks and best practices. CreateSpace, Denver, CO.
188. Sauro J, Lewis J (2012) Quantifying the user experience: Practical statistics for user research. Morgan-Kaufmann, Burlington, MA.
189. Schega L, Hamacher D, Böckelmann I, Mecke R, Huckauf A, Urbina M, Tümler J (2011) Wirkung unterschiedlicher mobiler Augmented-Reality-Systeme auf die Beanspruchung im industriellen Arbeitsprozess. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 46 (7): 402–410.
190. Scheuch K (2011) Arbeitsphysiologie. In: Triebig G, Ketner M, Schiele R (Hrsg.) *Arbeitsmedizin - Handbuch für Theorie und Praxis* 413–458. 3. vollständige überarbeitete Auflage Gentner, Stuttgart.
191. Scheuch K, Schröder H (1990) Mensch unter Belastung. Stress als ein humanwissenschaftliches Integrationskonzept. Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin.
192. Schlick C, Bruder R, Luczak H (2010) Arbeitswissenschaft. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage Springer, Heidelberg u.a.
193. Schmauder M (2018) Ergonomie: Anpassung der Arbeitsbedingungen an den Menschen. In: Kretschmer V, Spee D (Hrsg.) *Kognitive Ergonomie. Der Mensch - eingebunden in die Logistik 4.0* 23–30. huss, München.
194. Schmidt S, Minow A, Böckelmann I (2020) Einsatz und Aussagekraft etablierter quantitativer Usability-Fragebögen in einem User-Test. *Zbl Arbeitsmed* 108 (6): 256–263.
195. Schooler JW, Ohlsson S, Brooks K (1993) Thoughts beyond words: When language overshadows insight. *Journal of Experimental Psychology: General* 122 (2): 166–183.
196. Schreiber W, Zimmermann P (Hrsg. 2011) Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Das AVILUS-Projekt - Technologien und Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg.

197. Schuh G, Franzkoch B, Prote J-P, Luckert M, Sauermann F, Basse F (2017) Analysis of the Potential Benefits of Digital Assembly Instructions for Single and Small Batch Production. In: Lödding H, Riedel R, Thoben K-D, Cieminski G von, Kiritsis D (Hrsg.) *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing* 346–353. Springer International Publishing, Cham.
198. Schweighofer J (2016) Zur Befreiung des Menschen von mühevoller Arbeit und Plage durch Maschinen, Roboter und Computer - Auswirkungen der Digitalisierung auf die Arbeitsmärkte. *Wirtschaft und Gesellschaft* 2: 219–255.
199. Seidler A, Steputat A, Drössler S, Schubert M, Günther N, Staudte R, Kofahl M, Hegewald J (2018) Determinanten und Auswirkungen von Informationsüberflutung am Arbeitsplatz. *Zbl Arbeitsmed* 68 (1): 12–26.
200. Shakouri M, Ikuma LH, Aghazadeh F, Nahmens I (2018) Analysis of the sensitivity of heart rate variability and subjective workload measures in a driving simulator: The case of highway work zones. *International Journal of Industrial Ergonomics* 66: 136–145.
201. Shneiderman B (1987) *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Addison-Wesley, Reading.
202. Sonntag K (2016) *Das Projekt MEGa - Hintergründe, Aufgaben und Forschungsfelder*. Auftaktveranstaltung des BMBF-Förderschwerpunktes.
203. Spieth P, Klos C, Röth T, Beutner K (2020) *Fachkräftequalifizierung und -sicherung in der zukünftig digitalisierten Arbeitswelt: FachWerk. Multimediales Lehr- und Lernarrangement für die Adoption von IuK-Technologien im Handwerk. Projektergebnisse*. Kassel University Press, Kassel, Hess.
204. Steinhilber B, Luger T, Schwenkreis P, Middeldorf S, Bork H, Mann B, Glinski A von, Schildhauer TA, Weiler S, Schmauder M, Heinrich K, Winter G, Schnalke G, Frener P, Schlick R, Wischniewski S, Jäger M (2020) *S2k-Leitlinie: Einsatz von Exoskeletten im beruflichen Kontext zur Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention von arbeitsassoziierten muskuloskeletalen Beschwerden*.
205. Steinke I (2000) Gütekriterien qualitativer Forschung. In: Flick U, Kardorff Ev, Steinke I (Hrsg.) *Qualitative Forschung. Ein Handbuch* 319–331. Rowohlt Taschenbuch, Reinbek bei Hamburg.
206. Stockinger C, Steinebach T, Petrat D, Bruns R, Zöllner I (2020) The Effect of Pick-by-Light-Systems on Situation Awareness in Order Picking Activities. *Procedia Manufacturing* 45: 96–101.
207. Strobach T, Wendt M (2019) Gedächtnis. In: Strobach T, Wendt M (Hrsg.) *Allgemeine Psychologie* 33–39. Springer, Berlin, Heidelberg.
208. Strobel H (2013) *Auswirkungen von ständiger Erreichbarkeit und Präventionsmöglichkeiten. Teil 1: Überblick über den Stand der Wissenschaft und Empfehlungen für einen guten Umgang in der Praxis*, Berlin.
209. Stüring S (2016) *Verbundvorhabenbeschreibung 3D-basierte Assistenztechnologien für variantenreiche Montageprozesse - Menschzentrierter Arbeitsplatz der Zukunft ("3D-Montageassistent")* [internes Dokument].
2010. Swan JE, Gabbard JL (2005) Survey of User-Based Experimentation in Augmented Reality. In: *Proceedings 1st International Conference in Virtual Reality* 1–9, Las Vegas, Nevada.
2011. Tang A, Owen C, Biocca F, Mou W (2003) Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly. In: Cockton G, Korhonen P (Hrsg.) *Proceedings of the conference on Human factors in computing systems - CHI '03* 73. ACM Press, New York, New York, USA.
2012. Theis S, Pfendler C, Alexander T, Mertens A, Brandl C, Schlick CM (2016) *Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Physische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs*, Dortmund.

213. Thiemann P (2008) Benutzerfreundliche Online-Hilfen. Grundlagen und Umsetzung mit MadCap Flare. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
214. Tümler J (2009) Untersuchungen zu nutzerbezogenen und technischen Aspekten beim Langzeiteinsatz mobiler Augmented Reality Systeme in industriellen Anwendungen. Dissertation, Magdeburg.
215. Tümler J, Doil F, Mecke R, Paul G, Schenk M, Pfister EA, Huckauf A, Böckelmann I, Roggentin A (2008a) Mobile Augmented Reality in industrial applications: Approaches for solution of user-related issues. In: 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality 87–90. IEEE.
216. Tümler J, Roggentin A, Mecke R, Doil F, Huckauf A, Urbina MH, Pfister EA, Böckelmann I (2008b) Subjektive Beanspruchung beim Einsatz mobiler Augmented Reality Systeme. ErgoMed (5): 130–141.
217. Ullmann C (2006) Nutzerakzeptanz von Augmented Reality - Eine Fallstudie zum Vollschicht-einsatz in der Automobilproduktion. Diplomarbeit, Hamburg.
218. Ullrich D, Diefenbach S (2010) INTUI. Exploring the Facets of Intuitive Interaction. In: Ziegler J, Schmidt A (Hrsg.) Mensch & Computer 2010 251–260. Oldenbourg, München.
219. Umweltbundesamt (2016) Gutachten zur Gebrauchstauglichkeit des Unionsregisters im EU-Emissionshandelssystem, Berlin.
220. Venkatesh V, Davis F (1996) A model of the antecedents of perceived ease of use: Development and test. Decision Sciences 27 (3): 451–481.
221. Venkatesh V, Morris MG, Davis GB, Davis FD (2003) User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. MIS Quarterly 27 (3): 425.
222. Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG) (2020) Software nutzerfreundlich einstellen und gestalten. Die wichtigsten Tipps und Infos auf einen Blick. 2.6 , Hamburg.
223. Völker K (2010) (K)eine wie die andere? Handlungshilfe zum Kauf von ergonomischer Software. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund.
224. Wache S (2020) Arbeitsplatzsysteme fördern Integration. ErgoMed / Prakt. Arb. med. (2): 36–37.
225. Werrlich S, Daniel A, Ginger A, Nguyen P-A, Notni G (2018) Comparing HMD-Based and Paper-Based Training. In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 134–142. IEEE.
226. Wiesbeck M (2014) Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Dissertation, München.
227. Wille M (2016) Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs, Dortmund.
228. Wille M, Scholl PM, Wischniewski S, van Laerhoven K (2014) Comparing Google Glass with Tablet-PC as Guidance System for Assembling Tasks. In: 11th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks Workshops. Proceedings: 16-19 June 2014, Zurich, Switzerland 38–41. Conference Publishing Services, IEEE Computer Society, Los Alamitos, California.
229. Wilschut ES, Könemann R, Murphy MS, van Rhijn GJW, Bosch T (2019) Evaluating learning approaches for product assembly. In: Makedon F (Hrsg.) Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments 376–381. ACM, New York, NY, USA.
230. Wolf T, Strohschen J-H (2018) Digitalisierung: Definition und Reife. Informatik Spektrum 41 (1): 56–64.

231. Wolter MI, Mönning A, Schneemann C, Weber E, Zika G, Helmrich R, Maier T, Neuber-Pohl C (2015) Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft: Szenario-Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen (IAB-Forschungsbericht), Nürnberg.
232. Wu X, Haynes M, Guo A, Starner T (2016) A comparison of order picking methods augmented with weight checking error detection. In: Beigl M, Lukowicz P, Blanke U, Kunze K, Lee S"C" (Hrsg.) Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers - ISWC '16 144–147. ACM Press, New York, New York, USA.
233. Wu X, Haynes M, Zhang Y, Jiang Z, Shen Z, Guo A, Starner T, Gilliland S (2015) Comparing order picking assisted by head-up display versus pick-by-light with explicit pick confirmation. In: Mase K, Langheinrich M, Gatica-Perez D (Hrsg.) Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers - ISWC '15 133–136. ACM Press, New York, New York, USA.
234. Wulvik AS, Dybvik H, Steinert M (2020) Investigating the relationship between mental state (workload and affect) and physiology in a control room setting (ship bridge simulator). Cogn Tech Work 22 (1): 95–108.
235. Würffel N (2001) Protokolle Lauten Denkens als Grundlage für die Erforschung von hypertextgeleiteten Lernprozessen im Fremdsprachenunterricht. In: Müller-Hartmann A, Schocker van Ditfurth M (Hrsg.) Qualitative Forschung im Bereich Fremdsprachen lehren und lernen 163–186. Narr, Tübingen.
236. Zerssen D von, Koeller DM (1976) Die Befindlichkeits-Skala: Parallelförmige Bf-S und Bf-S'. Beltz Test Gesellschaft mbH, Weinheim.
237. Zijlstra FRH (1993) Efficiency in work behaviour. A design approach for modern tools. Delft University Press, Delft.
238. Zijlstra FRH, Doorn L, van (1985) The Construction of a Scale to Measure Perceived Effort. Dissertation, Delft.
239. Ziliak ST, McCloskey DN (2016) The cult of statistical significance. How the standard error costs us jobs, justice, and lives. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
240. Zimmermann P, Fimm B (2009) TAP - Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung. Version 2.2. Psytest, Freiburg.
241. Zimmermann P, Fimm B (2015) TAP - Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung. Version 2.3 Teil 1. Psytest, Freiburg.
242. Zintl F, Eisenhut A (2009) Ausdauertraining. Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung. 7. überarbeitete Auflage BLV Buchverlag, München.

Danksagung

Die Danksagung ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel

„Arbeitsphysiologische Untersuchungen beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme für variantenreiche Montageprozesse in der Arbeitswelt 4.0“

im Bereich Arbeitsmedizin

mit Unterstützung durch

Frau Prof. Dr. med. habil. Irina Böckelmann

ohne sonstige Hilfe durchgeführt und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Bei der Abfassung der Dissertation sind Rechte Dritter nicht verletzt worden.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Magdeburg, den 25.01.2021

.....
Annemarie Minow

Darstellung des Bildungsweges

Die Darstellung des Bildungswegs ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Die Darstellung des Bildungswegs ist in der Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Publikationsverzeichnis

Originalarbeiten

1. **Minow A**, Stüring S, Böckelmann I (2020) Gebrauchstaugliche Assistenzsysteme in der manuellen Montage – ein Vergleich von Pick-to-Light und AR-Konturen mittels VR-Simulation. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 24(1), DOI: 10.1007/s41449-020-00228-5
2. Schmidt S, **Minow A**, Böckelmann I (2020) Einsatz und Aussagekraft etablierter quantitativer Usability-Fragebögen in einem User-Test. Zbl Arbeitsmed, 70(6), 256–263, DOI: 10.1007/s40664-020-00399-2
3. Hillmert M, Bergmüller A, **Minow A**, Raggatz J, Böckelmann I (2020) Psychophysiologische Beanspruchungskorrelate während kognitiver Belastung: Eine Laborstudie mittels EEG und EKG. Zbl Arbeitsmed, 70(4), 149–163, DOI: 10.1007/s40664-020-00384-9
4. **Minow A**, Böckelmann I (2020) Beanspruchung, objektive Leistung und Gebrauchstauglichkeit bei simulierten Montageprozessen mit digitalen Arbeitsanweisungen. Zbl Arbeitsmed, 70(2), 47–56, DOI:10.1007/s40664-019-00372-8
5. Dorn A³⁰, **Minow A**³⁰, Darius S, Böckelmann I (2020) Auswirkungen von Aufmerksamkeitstests unterschiedlicher kognitiver Anforderungen auf die Auslenkung der HRV-Parameter. Zbl Arbeitsmed 70(3), 99–108, DOI: 10.1007/s40664-019-00374-6
6. **Minow A**, Swart E (2019) Arbeitsbezogene erweiterte Erreichbarkeit. Zbl Arbeitsmed, 69(1), 11–15, DOI: 10.1007/s40664-018-0285-6

Übersichtsarbeiten

1. Böckelmann I, **Minow A** (2018) Nutzung digitaler Assistenzsysteme. Sicherheits- und Gesundheitsaspekte beim Einsatz neuer Technologien. Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed 11, 702–707

Buch- und Kongressbeiträge

1. **Minow A**, Darius S, Böckelmann I (2021) Wie stark gibt die HRV die aktuelle Beanspruchungslage bei manuellen Montageprozessen wieder? In: Hottenrott K, Böckelmann I, Schmidt H (Hrsg.) 8. HRV-Symposium Herzfrequenzvariabilität: Anwendungen in Forschung und Praxis (Online) (im Druck)
2. Mecke R, Adler S, Jachmann D, Weigel M, Eichholz S, Schmicker S, Mewes E, Böckelmann I, **Minow A**, Bergmüller A (2021) Gesundes mobiles Arbeiten mit digitalen Assistenzsystemen im technischen Service (ArdiAS). In: Bauer W, Mütze-Niewöhner S, Stowasser S, Zanker C, Müller N (Hrsg.) Arbeit in der digitalisierten Welt - Praxisbeispiele und Gestaltungslösungen aus dem BMBF-Förderschwerpunkt. Springer Vieweg (im Druck)
3. **Minow A**, Stüring S, Böckelmann I (2020) Mental Effort and Usability of Assistance Systems in Manual Assembly – A Comparison of Pick-to-Light and AR Contours Through VR Simulation. In: Stephanidis C, Antona M (Hrsg.) HCI International 2020

³⁰ Die Autoren Annegret Dorn und Annemarie Minow haben zu gleichen Teilen der Arbeit beigetragen.

- Posters. HCII 2020. Communications in Computer and Information Science, Vol 1224. Springer, Cham, 455–461
4. **Minow A**, Stüring S, Böckelmann I (2019) VR-Simulation von Assistenzfunktionen in der manuellen Montage – ein Ansatz für arbeitsphysiologische Vergleiche nutzerbezogener Aspekte im Entwurfsprozess. In: Putz M, Klimant P, Klimant F (Hrsg.): Tagungsband VAR² 2019 – Realität erweitern. 5. Fachkonferenz zu VR/AR-Technologien in Anwendung und Forschung an der Professur Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik, Chemnitz, 139–149
 5. Mewes E, Wassmann S, **Minow A**, Adler S, Schmicker S (2019) Laborversuch zur Validierung der Nutzerfreundlichkeit eines digitalen Assistenzsystems für den Einsatz in der mobilen Instandhaltung. In: 14. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2019 - Magdeburger Ingenieurtag - 24. - 25. September 2019: Tagungsband - Magdeburg: Otto von Guericke Universität Magdeburg, Fakultät Maschinenbau, Institut für Mobile Systeme - Lehrstuhl Mechatronik. 320–329
 6. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Nutzerzentrierung zur nachhaltigen Digitalisierung in der Produktion aus arbeitsmedizinischer Sicht. In: Schenk M, Adler S (Hrsg.): Nachhaltigkeit bei der Nutzung digitaler Daten in der Produktion, 22–29, DOI: 10.24406/iff-n-581274
 7. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Visuelle Ermüdung, Motivations- und Beanspruchungslage sowie Usability bei modellierten Montageprozessen. In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt, 129–131
 8. Bergmüller A, **Minow A**, Darius S, Böckelmann I (2019) Objektive Beanspruchung bei der Arbeit mit optischen digitalen Assistenzsystemen: Ein systematischer Überblick. In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt, 52–54
 9. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Empfehlungen für Forschung und Praxis zu Nutzerakzeptanz, Usability und User Experience bei der Entwicklung und beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme. In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt, 50–51
 10. Böckelmann I, **Minow A**, Bergmüller A, Mewes E, Darius S, Mecke R (2019) Die Rolle und Einordnung digitaler Assistenzsysteme in der Arbeit 4.0. In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt, 47–49
 11. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Vergleich der Motivation und subjektiven Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen. In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt, 356–358
 12. **Minow A**, Greiner K, Ebenthal K (2019) Handlungswissen, Professionalität und Positionierung – Die Schlüsselvariablen im Umgang mit Opfern und Tätern bei Schutz- und Kriminalpolizisten. In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt, 359–361
 13. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme: Was haben wir und was fehlt

- uns? In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt, 367–369
14. Mewes E, Waßmann S, Adler S, **Minow A**, Schmicker S (2019) Entwicklung eines Laboraufbaus zur Erprobung eines digitalen Assistenzsystems für den Einsatz in der mobilen Instandhaltung. In: GfA Frühjahrskongress 2019, Dresden GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2019, Dresden Beitrag D. 1.5 ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(f)T – Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung, 1–6
 15. **Minow A**, Greiner K, Ebenthal K (2019) Der Umgang mit Opfern und Tätern bei Polizeibeamtinnen und -beamten: Anwendung der Grounded Theory anhand problemzentrierter Interviews. In: GfA Frühjahrskongress 2019, Dresden GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2019, Dresden Beitrag E. 1.2 ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(f)T – Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung, 1–5
 16. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Motivation und subjektive Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen – Ergebnisse einer Pilotstudie. In: GfA Frühjahrskongress 2019, Dresden GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2019, Dresden Beitrag E. 1.3 ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(f)T – Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung, 1–5
 17. **Minow A**, Böckelmann I (2018) Nutzerbezogene Aspekte beim Einsatz von digitalen Assistenztechnologien im Montagebereich – ein systematischer Review. In: Tagungsband zur 58. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 07. - 09. März 2018 in München, 91–92
 18. **Minow A**, Baumgarten K, Swart E (2018) Ständige Erreichbarkeit als psychischer Belastungsfaktor bei Führungskräften eines Unternehmens der Sozial- und Gesundheitsbranche in Sachsen-Anhalt. In: Tagungsband zur 58. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 07. - 09. März 2018 in München, 425–427
 19. **Minow A**, Böckelmann I (2018) Beanspruchungsindikatoren mit neuen digitalen Assistenztechnologien - Wie smarte Arbeit 4.0 gelingt. In: Kognitive Ergonomie: Der Mensch – eingebunden in die Logistik 4.0 – München: Huss-Verlag, ISBN: 978-3-946350-86-6, 106–113
 20. **Minow A**, Swart E, Baumgarten K (2018) Arbeitsbezogene erweiterte Erreichbarkeit bei Führungskräften aus der Sozial- und Gesundheitsbranche – Ergebnisse einer Analyse problemzentrierter Interviews. In: GfA Frühjahrskongress 2018, Frankfurt a. M. GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2018, Frankfurt a. M. Beitrag E. 1.2 ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(f)T - Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung, 1–6

Vorträge und Poster

1. **Minow A**, Darius S, Böckelmann I (2020) Wie stark gibt die HRV die aktuelle Beanspruchungslage bei manuellen Montageprozessen wieder? Vortrag 8. HRV-Symposium 2020 - Herzfrequenzvariabilität: Anwendungen in Forschung und Praxis, 14. November 2020 in Halle (Saale)
2. **Minow A**, Stüring S, Böckelmann I (2020) Mental Effort and Usability of Assistance Systems in Manual Assembly – A Comparison of Pick-to-Light and AR Contours through VR Simulation. Poster 22. International Conference on Human-Computer Interaction (HCI), 19 - 24. Juli 2020 in Kopenhagen
3. **Minow A**, Stüring S (2019) VR-Simulation von Assistenzfunktionen in der manuellen Montage – ein Ansatz für arbeitsphysiologische Vergleiche nutzerbezogener As-

- pekte im Entwurfsprozess. Vortrag VAR² 2019 – Realität erweitern. 5. Fachkonferenz zu VR/AR-Technologien in Anwendung und Forschung an der Professur Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik, 04. - 05. Dezember 2019 in Chemnitz
4. **Minow A** (2019) Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme und arbeitsmedizinischen Vorsorge: Alles geregelt? Wo stehen wir? Vortrag Weiterbildungsveranstaltung für Betriebsärzte, 03. April 2019 in Magdeburg
 5. **Minow A** (2019) Ergonomische Gestaltung digitaler Assistenzsysteme. Ein entscheidender Punkt für die Nutzerakzeptanz? Vortrag Weiterbildungsveranstaltung für Betriebsärzte, 03. April 2019 in Magdeburg
 6. **Minow A** (2019) Ständige Erreichbarkeit: Welche Empfehlungen kann der Betriebsarzt dem Arbeitgeber und dem Arbeitnehmer geben? Vortrag Weiterbildungsveranstaltung für Betriebsärzte, 03. April 2019 in Magdeburg
 7. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Visuelle Ermüdung, Motivations- und Beanspruchungslage sowie Usability bei modellierten Montageprozessen. Vortrag 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt
 8. Bergmüller A, **Minow A**, Darius S, Böckelmann I (2019) Objektive Beanspruchung bei der Arbeit mit optischen digitalen Assistenzsystemen: Ein systematischer Überblick. Vortrag 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt
 9. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Empfehlungen für Forschung und Praxis zu Nutzerakzeptanz, Usability und User Experience bei der Entwicklung und beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme. Vortrag 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt
 10. Böckelmann I, **Minow A**, Bergmüller A, Mewes E, Darius S, Mecke R (2019) Die Rolle und Einordnung digitaler Assistenzsysteme in der Arbeit 4.0. Vortrag 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt
 11. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Vergleich der Motivation und subjektiven Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen. Poster 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt
 12. **Minow A**, Greiner K, Ebenthal K (2019) Handlungswissen, Professionalität und Positionierung – Die Schlüsselvariablen im Umgang mit Opfern und Tätern bei Schutz- und Kriminalpolizisten. Poster 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt
 13. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme: Was haben wir und was fehlt uns? Poster 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. - 22. März 2019 in Erfurt
 14. **Minow A**, Greiner K, Ebenthal K (2019) Der Umgang mit Opfern und Tätern bei Polizeibeamtinnen und -beamten: Anwendung der Grounded Theory anhand problemzentrierter Interviews. Poster. GfA Frühjahrskongress 2019, Dresden
 15. **Minow A**, Böckelmann I (2019) Motivation und subjektive Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen – Ergebnisse einer Pilotstudie. Poster. GfA Frühjahrskongress 2019, Dresden

16. **Minow A**, Böckelmann I (2018) Pilotstudie zum Vergleich der Motivation und subjektiven Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen. Vortrag Forum Arbeitsphysiologie, 22. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler, 16. - 18. November 2018 in Tübingen, Kurzfassung Kongressband (ISBN 978-3-00-061446-0), 15
17. **Minow A**, Greiner K, Ebenthal K (2018) Wie entstehen Belastungsmomente im Umgang mit Opfern und Tätern bei Polizeibeamtinnen und -beamten? Poster Forum Arbeitsphysiologie, 22. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler, 16. - 18. November 2018 in Tübingen, Kurzfassung Kongressband (ISBN 978-3-00-061446-0), 27
18. Böckelmann I, **Minow A**, Darius S, Abele ND, Mecke R (2018) Fragen der Gesundheit und Ergonomie bei der Nutzung digitaler Assistenzsysteme. Vortrag Deutscher Betriebsärzte-Kongress 17. - 20. Oktober in Lübeck
19. **Minow A**, Böckelmann I (2018) Aus der Forschung für die Praxis – Erkenntnisse humanzentrierter Studien beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme. Vortrag Deutscher Betriebsärzte-Kongress 17. - 20. Oktober in Lübeck
20. **Minow A** (2018) Immer erreichbar – muss das sein? Vortrag 13. Lange Nacht der Wissenschaft der Landeshauptstadt Magdeburg, 02. Juni 2018 in Magdeburg
21. **Minow A**, Böckelmann I (2018) Nutzerbezogene Aspekte beim Einsatz von digitalen Assistenztechnologien im Montagebereich – ein systematischer Review. Vortrag 58. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 07. - 09. März 2018 in München, 54
22. **Minow A**, Baumgarten K, Swart E (2018) Ständige Erreichbarkeit als psychischer Belastungsfaktor bei Führungskräften eines Unternehmens der Sozial- und Gesundheitsbranche in Sachsen-Anhalt. Poster 58. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 07. - 09. März 2018 in München, 137-138
23. **Minow A**, Swart E, Baumgarten K (2018) Arbeitsbezogene erweiterte Erreichbarkeit bei Führungskräften aus der Sozial- und Gesundheitsbranche – Ergebnisse einer Analyse problemzentrierter Interviews. Poster GfA Frühjahrskongress 2018, Frankfurt a. M.
24. **Minow A**, Baumgarten K, Swart E (2017) Ständige Erreichbarkeit als psychischer Belastungsfaktor bei Führungskräften eines Unternehmens der Sozial- und Gesundheitsbranche in Sachsen-Anhalt. Vortrag Forum Arbeitsphysiologie, 21. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler, 17. - 19. November 2017 in Bad Münde, Kurzfassung Kongressband (ISBN 978-3-936841-31-2), 15

Herausgeberschaft

1. Böckelmann I, Darius S, **Minow A** (Hrsg.) (2019) 23. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler. Kurzfassungen der Vorträge und Poster. 08. - 10.11.2019. Magdeburg. Sonderschrift des Forums Arbeitsphysiologie. ISBN: 978-3-00-0663516-8

Projektberichte

1. Mewes E, Bergmüller A, **Minow A**, Waßmann S, Weigel M, Eichholz S, Adler S, Böckelmann I, Schmicker S, Mecke R (2020) Digitale Assistenzsysteme zur mobilen Verwendung im technischen Service: ein Leitfaden für die Gestaltung und Nutzung (ISBN 978-3-00-065405-3)
2. Böckelmann I, **Minow A**, Schmidt S (2020) Teilvorhabenbeschreibung: Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz im Verbundvorhaben 3D-basierte Assistenztechnologien für variantenreiche Montageprozesse – Menschzentrierter Arbeitsplatz der Zukunft („3D-Montageassistent“): Abschlussbericht: Projektlaufzeit 01. April 2017 - 31. März 2020. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg

Anlagen

A1: Auswahl der Suchstringkomponenten zu nutzerbezogenen Aspekten beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme

Suchstringkomponenten	Suchbegriffe	
Arbeitsumfeld	u. a. Assembly, Production, Industry	
Assistenzsystem	u. a. Assist*, Augmented Reality, Virtual Reality, Mixed Reality, Smartwatch, Smart Watch, Tablet, Smartphone, HMD, HUD, Head-Mounted-Display, Head-Up-Display, Headset, Pick-by-Light, Pick-to-Light, Pick-by-Vision, Mobile Device, Wearable, Laptop, Paper-Based, Manual, Instruction, Digital, Electronic	
Outcome-Parameter	Objektive und subjektive Beanspruchung	u. a. Demand, Strain, Load, Stress, VFQ, Visual Fatigue, NASA-TLX, HRV, Heart Rate Variability
	Objektive Leistung	u. a. Time, Error, Rate
	Usability / User Experience / Nutzerakzeptanz	u. a. User Study, Human Factor, User Interface, User-Centered Design, Usability, User Experience, Acceptance
Zeitraum	ab 2000 Der Zeitraum ist für ein sich technologisch schnell wandelndes Themengebiet groß gewählt, jedoch ist die Anzahl nutzerbezogener Studien insgesamt begrenzt.	
Sprache	Englisch und Deutsch	
Datenbanken	u. a. PubMed, IEEE, DBLP, Scopus, Web of Science, PSYINDEX und Medline	

**UNIVERSITÄTSKLINIKUM
MAGDEBURG A.Ö.R.**



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG



Ethik-Kommission, Medizinische Fakultät / Universitätsklinikum, Leipziger Str. 44 Haus 28, 39120 Magdeburg

Frau Prof. Dr. Böckelmann, Frau Minow
Bereich Arbeitsmedizin
Universitätsklinikum A. ö. R.
Leipziger Str. 44
39120 Magdeburg

**Ethik-Kommission der
Otto-von-Guericke-
Universität an der
Medizinischen Fakultät und
am Universitätsklinikum
Magdeburg A.ö.R.**

Univ.-Prof. Dr. med. Christof Huth
Vorsitzender

Dr. med. Norbert Beck
Geschäftsführer

Datum
20.11.2017

Telefon: +49 391 67-14314
Telefax: +49 391 67-14354
elektr.Fax: +49 391 67-290185
eMail: ethikkommission@ovgu.de

Unser Zeichen: **185/17**

**Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz
BMBF-gefördertes Verbundvorhaben „3D-basierte Assistenztechnologien für variantenreiche Montageprozesse –Menschzentrierter Arbeitsplatz der Zukunft“ (Förderkennzeichen 03ZZ0441E)**

Sehr geehrte Frau Prof. Dr. Böckelmann, sehr geehrte Frau Minow,
sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

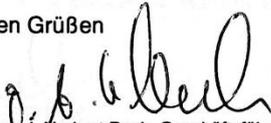
die Ethik-Kommission der Otto-von-Guericke-Universität an der Medizinischen Fakultät und am Universitätsklinikum Magdeburg hat die übergebenen Unterlagen zur o. g. Studie überprüft, in der letzten Kommissionssitzung eingehend erörtert und ist zu der Auffassung gekommen, dass gegen die Durchführung keine ethischen Bedenken bestehen.
Diese **zustimmende Bewertung** ergeht unter dem Vorbehalt gleichbleibender Gegebenheiten.

Die Verantwortlichkeit des jeweiligen Prüfwissenschaftlers / behandelnden Prüfarztes bleibt in vollem Umfang erhalten und wird durch diese Entscheidung nicht berührt. Alle zivil- oder haftungsrechtlichen Folgen, die sich ergeben könnten, verbleiben uneingeschränkt beim Projektleiter und seinen Mitarbeitern.

Beim Monitoring sind die Bestimmungen des Bundes- und Landesdatenschutzgesetzes sowie die sich aus der ärztlichen Schweigepflicht ergebenden Einschränkungen zu beachten, was eine Aushändigung kompletter Patientenakten zum Monitoring ausschließt.
Ein Monitoring personen- und studienbezogener Daten wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Um die Übersendung von studienbezogenen Jahresberichten / Abschlussberichten / Publikationen wird unter Nennung unserer Registraturnummer gebeten.

Mit freundlichen Grüßen


(i. A. Dr. med. Norbert Beck, Geschäftsführer)
Prof. Dr. med. C. Huth
Vorsitzender der Ethik-Kommission

Ethik-Kommission
der Otto-von-Guericke-Universität an der Medizinischen Fakultät
und am Universitätsklinikum Magdeburg A.ö.R.
Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. med. C. Huth



3Dsensation
Mensch. Maschine. Umwelt. ZUKUNFT



Studienteilnehmer/-innen gesucht

Belastungen und Beanspruchungen bei Montagetätigkeiten

Was sind unsere Ziele?

- vergleichende Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei einer Montageaufgabe mit und ohne digitalem Assistenzsystem
- Vorschläge zu konkreten Empfehlungen für die Entwicklung von digitalen Assistenzsystemen in der Montage

Was ist Ihre Aufgabe?

- Zusammenbau kleiner geometrischer Figuren mit Elementen aus einem Baukasten
- Tragen eines EKG-Messgerätes
- Teilnahme an Aufmerksamkeitstests und die Beantwortung von standardisierten arbeitspsychologischen Fragebögen
- Zeitaufwand 2,5 bis max. 3 Stunden

Was bieten wir Ihnen?

- kostenfreie Untersuchung des Herz-Kreislaufsystems, der Augen und der kognitiven Leistungsfähigkeit mit individueller Auswertung der Ergebnisse
- Wir garantieren den streng vertraulichen Umgang mit den erhobenen Daten. Es können keine Rückschlüsse auf Einzelpersonen geschlossen werden. Die Daten dienen nur Forschungszwecken und Ihrem persönlichen Gebrauch.
- Anrechnung für Versuchspersonenstunden

Melden Sie sich gerne bei uns!

Wir suchen Probanden und Probandinnen im Alter von 18 - 67 Jahren ohne Stoffwechselerkrankungen und Herzrhythmusstörungen



Kontakt:

Für die Vereinbarung des Untersuchungstermins oder Fragen zur Studie wenden Sie sich bitte an:

Annemarie Minow

Bereich Arbeitsmedizin (Haus 20, Zi. 311), Medizinische Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Leipziger Straße 44, 39120 Magdeburg

Tel.: 0391 67-25126 oder E-Mail: annemarie_minow@med.ovgu.de

Tel.: 0391 67-25126
annemarie_minow@med.ovgu.de

A4: Probandeninformation zur Vorstudie

Sehr geehrte(r) Studienteilnehmer(in),

mit diesem Schreiben möchten wir Sie über die Studie „Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz“ informieren und Sie um Ihre Einwilligung zur Teilnahme an diesem Forschungsvorhaben bitten. Lesen Sie die Information bitte sorgfältig durch. Falls Sie über diese Information hinaus noch weitere Fragen zur Studie haben, beantworten wir Ihnen diese gerne.

Ziel dieser Studie ist es, die Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Arbeitspersonen bei der Anwendung eines Assistenzsystems bei industriellen Montageprozessen zu analysieren, die dabei entstehenden Arbeitsbelastungen an den Arbeitsplätzen und die daraus resultierenden Beanspruchungsfolgen zu beurteilen sowie die Akzeptanz zu erfassen. Die Belastungs-Beanspruchungsanalyse wird bei Montageprozessen mit und ohne 3D-basierte Assistenztechnologien durchgeführt und vergleichend ausgewertet.

Im Rahmen der Untersuchung werden Ihr subjektives Beanspruchungsempfinden mithilfe von Fragebögen und die objektive Beanspruchung mittels physiologischer Parameter ermittelt. Dabei wird bei Ihnen eine EKG-Aufnahme mittels eines EKG-Rekorders Medilog Fa. Schiller erfolgen. Aus der EKG-Aufzeichnung wird dann mittels mathematischer Methoden die Herzfrequenzvariabilität (HRV) berechnet, die die Änderung des zeitlichen Abstandes zwischen zwei Herzschlägen beschreibt. Die Änderung dieser Abstände ist eine Fähigkeit des vegetativen Nervensystems, sich an bestimmte Situationen anzupassen. So reagiert der Organismus zum Beispiel auf Stress mit einer Reduzierung der HRV, bei Beruhigung der Situation erhöht sich die HRV wieder. Dabei handelt es sich um einen wichtigen Kompensationsmechanismus des Körpers.

Der komplette Testdurchlauf dauert maximal drei Stunden. Zu Beginn werden einige Fragen zur Person (soziodemografische Daten) gestellt, eine augenärztliche Statusuntersuchung wird durchgeführt und Fragebögen zur Selbsteinschätzung Ihrer momentanen subjektiven Beanspruchung ausgehändigt. Danach werden Sie, nach einer kurzen Ruhepause, in zwei Durchläufen einen Montageauftrag bearbeiten (einmal mit einer Papierliste, einmal mithilfe einer digitalen Liste). Während der Bearbeitung des Montageauftrags werden, wie bereits beschrieben, nicht-invasiv physiologische Parameter (Herzfrequenzvariabilitätsparameter) erhoben. Nach der Bearbeitung des Montageauftrags erfolgt erneut eine kurze Ruhepause sowie das Ausfüllen von Fragebögen zu Ihrem Beanspruchungsempfinden.

Bitte nehmen Sie nur an der Studie teil, wenn Sie momentan nicht unter besonderen physischen oder psychischen Belastungen stehen.

Die Erhebung der Daten und Parameter erfolgt nach standardisierten Methoden. Sämtliche Daten werden anonymisiert und streng vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig und kann jederzeit ohne Angabe der Gründe abgebrochen werden. Durch einen Studienabbruch entstehen Ihnen keinerlei Nachteile.

Studie

„Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenten“

des Bereiches für Arbeitsmedizin an der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Name des Probanden:

EINWILLIGUNGSERKLÄRUNG

Mir ist bekannt, zu welchem Zweck die Untersuchungen erfolgen.

Über Wesen, Bedeutung und Tragweite der Untersuchungen bin ich eingehend unterrichtet worden, wobei ich zum Ablauf und zu möglichen Risiken Fragen stellen konnte. Ich hatte angemessen Zeit, mich zu entscheiden.

Weiterhin wurde mir verbindlich zugesichert, dass die Ergebnisse meiner Untersuchung streng vertraulich behandelt werden und ausschließlich Forschungszwecken dienen.

Hiermit willige ich ein, an der Studie teilzunehmen. Mir ist bekannt, dass ich meine Einwilligung jederzeit und ohne Angaben von Gründen widerrufen kann.

Ich möchte über die Ergebnisse des EKG informiert werden: Ja Nein

.....
Ort, Datum

Unterschrift Proband

.....
Ort, Datum

Unterschrift Studienleitung

A6: Vorstudie: Soziodemografische Angaben und Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen

Mit folgenden Fragen möchten wir einige Informationen zu Ihrer Person erhalten, die für die Auswertung der Untersuchung von Bedeutung sein können. Bitte beantworten Sie alle Fragen wahrheitsgemäß.

1. Alter _____

2. Geschlecht weiblich männlich divers

3. Gewicht _____

4. Größe _____

5. Tragen Sie Kontaktlinsen oder eine Brille? ja nein

6. Brillendaten R _____ L _____

7. Augenerkrankungen ja nein

7.1 Falls ja, welche? _____

8. Haben Sie bereits Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen?

- Ja, ich arbeite täglich mit digitalen Assistenzsystemen.
- Ja, ich nutze diese Systeme oft.
- Ja, ich habe digitale Assistenzsysteme bereits ausprobiert.
- Nein, aber ich habe schon von solchen Systemen gehört.
- Nein, ich habe noch nie von solchen Systemen gehört.

**9. Wie viele Stunden verbringen Sie am Tag durchschnittlich am Bildschirm?
Bitte denken Sie sowohl an den Arbeitsbereich als auch an den Hobbybereich.**

10. Haben Sie im Moment körperliche Beschwerden? Wenn ja, welche?

11. Nehmen Sie regelmäßig Medikamente ein? Wenn ja, welche?

12. Bitte machen Sie im Folgenden Angaben zu Ihrem Rauchverhalten.

12.1 Ich rauche ja nein

12.1.1 Falls ja: Wie viele Zigaretten rauchen Sie pro Tag? _____

12.1.2 Falls nein: Sind Sie Passivraucher? ja, ca. _ Stunden pro Tag nein

12.2 Ich rauche nicht mehr.

12.2.1 Wann haben Sie aufgehört zu rauchen? _____

12.2.2 Wie lange haben Sie geraucht? _____

12.2.3 Wie viele Zigaretten haben Sie pro Tag geraucht? _____

13. Bitte machen Sie im Folgenden Angaben zu Ihrem Alkoholkonsum.

13.1 Trinken Sie im Allgemeinen Alkohol?

ja nein

13.2 Wie häufig trinken Sie Alkohol?

	täglich	3-4 x pro Wo- che	1-2 x pro Wo- che	ca. 1 x im Mo- nat	seltener oder nie
Bier	<input type="checkbox"/>				
Wein / Sekt	<input type="checkbox"/>				
Spirituosen	<input type="checkbox"/>				

13.3 Wie viel Bier (0,5 l) trinken Sie pro Trinksituation? _____ Glas

13.4 Wie viel Wein / Sekt (0,2 l) trinken Sie pro Trinksituation? _____ Glas

13.5 Wie viel Spirituosen (2 cl) trinken Sie pro Trinksituation? _____ Glas

14. Leiden Sie unter einer der folgenden Erkrankungen?

Bluthochdruck

- Ja, und ich nehme Medikamente dagegen ein
- Ja, aber ich nehme keine Medikamente dagegen ein
- Nein

Diabetes mellitus

- Ja, und ich nehme Medikamente dagegen ein
- Ja, aber ich nehme keine Medikamente dagegen ein
- Nein

Herzrhythmusstörung

- Ja, und ich nehme Medikamente dagegen ein
- Ja, aber ich nehme keine Medikamente dagegen ein
- Nein

A7: Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ)

Bemerken Sie, dass Sie im Moment von einem dieser Symptome beeinträchtigt werden?
 Kreuzen Sie bitte die Skala an der entsprechenden Stelle an.

1. Trockene Augen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
2. Tränende Augen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
3. Die Augen sind gereizt oder brennen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
4. Schmerzen in oder um die Augen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
5. Schwere Augen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
6. Schwierigkeiten Linien verfolgen zu können	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
7. Schwierigkeiten scharf zu sehen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
8. Springender Text	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
9. Verschwommene Buchstaben	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
10. Blendung durch Lichter	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
11. Verschwommene Sicht	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
12. Doppelsehen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
13. Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
14. Nackenschmerzen	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
15. Übelkeit	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			
16. Geistige Ermüdung	<input type="checkbox"/>								
	nicht bemerkbar					stark bemerkbar			

A8: Eigenzustandsskala (EZ-Skala)

In diesem Fragebogen werden Ihnen Fragen zu Ihrem augenblicklichen Zustand gestellt. Beantworten Sie die Fragen intuitiv.

Auf meinen augenblicklichen Zustand zutreffend:	kaum (1)	etwas (2)	einigermaßen (3)	ziemlich (4)	überwiegend (5)	völlig (6)
gespannt						
schläfrig						
beliebt						
kraftvoll						
gutgelaunt						
routiniert						
anstrengungsbereit						
unbefangen						
energiegeladen						
geachtet						
heiter						
ausdauernd						
sorgenfrei						
selbstsicher						
ausgeruht						
überlegen						
erholungsbedürftig						
zufrieden						
unternehmungslustig						
abgehetzt						
ruhig						
kontaktbereit						
müde						
anerkannt						
fröhlich						
nervös						
geübt						
konzentrationsfähig						
harmonisch						
sicher						
matt						
mitteilsam						
gelassen						
aktiv						
gefestigt						
erholt						
nützlich						
arbeitsfreudig						
vergnügt						
verausgabt						

A9: Instruktion des TAP-Tests (Augenbewegung)

Augenbewegung

Bei dieser Aufgabe können auf dem Bildschirm folgende Zeichen erscheinen:

└┐ |┐

Diese Zeichen können links, in der Mitte oder rechts auf dem Bildschirm erscheinen.

Drücken Sie bitte so schnell wie möglich die Taste, wenn Sie das folgende Zeichen sehen:

|┐

Bitte schauen Sie während des Versuchs immer auf das Zeichen in der Mitte des Bildschirms! Schauen Sie nur nach links oder rechts, wenn dort ein Zeichen erscheint!

Taste drücken (abbrechen mit X)

A10: Fragebogen zum NASA-TLX

Im Folgenden werden Sie gefragt, inwiefern bestimmte Belastungsfaktoren zu Ihrem Beanspruchungsempfinden beigetragen haben. Diese sind:

Geistige Anforderungen (gering bis hoch)

- Welche geistigen Anforderungen waren bei der Informationsaufnahme und -verarbeitung erforderlich (z. B. Denken, Entscheiden, Berechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen usw.)?
- War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erforderte sie eine hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?

Körperliche Anforderungen (gering bis hoch)

- Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich? (z. B. Ziehen, Drücken, Drehen, Kontrollieren, Aktivieren usw.)
- War die Aufgabe leicht oder schwer, langsam oder hektisch, locker oder anstrengend, ruhig oder arbeitsam?

Zeitliche Anforderungen (gering bis hoch)

- Welchen Zeitdruck empfanden Sie aufgrund der Geschwindigkeit, mit der die Aufgabe bzw. Aufgabenelemente auftauchten?
- War die Aufgabe langsam und gemütlich oder schnell und rasant?

Erbrachte Leistung (perfekt bis versagt)

- Wie erfolgreich haben Sie die Aufgabenziele, die der Experimentator (oder sie selbst) gesetzt hatten, erfüllt?
- Wie zufrieden waren sie mit der Aufgabenerfüllung?

Anstrengung (gering bis hoch)

- Wie hart mussten Sie arbeiten (geistig, körperlich), um die Leistung zu erbringen?

Frustration (gering bis hoch)

- Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert bzw. wie sicher, zustimmend, entspannt und erfüllt fühlten Sie sich während der Aufgabe?

Bitte wägen sie jeweils ab, welcher der nachfolgenden Belastungsfaktoren mehr zur Aufgabenbeanspruchung beiträgt. Kreisen Sie diesen bitte ein.

Geistige Anforderungen	oder	Körperliche Anforderungen
Geistige Anforderungen	oder	Zeitliche Anforderungen
Geistige Anforderungen	oder	Erbrachte Leistung
Geistige Anforderungen	oder	Anstrengung
Geistige Anforderungen	oder	Frustration
Körperliche Anforderungen	oder	Zeitliche Anforderungen
Körperliche Anforderungen	oder	Erbrachte Leistung
Körperliche Anforderungen	oder	Anstrengung
Körperliche Anforderungen	oder	Frustration
Zeitliche Anforderungen	oder	Erbrachte Leistung
Zeitliche Anforderungen	oder	Anstrengung
Zeitliche Anforderungen	oder	Frustration
Erbrachte Leistung	oder	Anstrengung
Erbrachte Leistung	oder	Frustration
Anstrengung	oder	Frustration

A11: Fragebogen zur SUS (Vorstudie)

Bitte geben Sie im Folgenden an, inwiefern Sie die soeben genutzte Hilfestellung (Papierliste oder digitale Liste) in Hinblick auf folgende Aussagen einschätzen.

	stimme gar nicht zu				stimme voll zu
Ich kann mir sehr gut vorstellen, die Hilfestellung regelmäßig zu nutzen.	1	2	3	4	5
Ich empfinde die Hilfestellung als unnötig komplex.	1	2	3	4	5
Ich empfinde die Hilfestellung als einfach zu benutzen.	1	2	3	4	5
Ich denke, dass ich Unterstützung brauchen würde, um die Hilfestellung zu nutzen.	1	2	3	4	5
Ich finde, dass es in der Hilfestellung zu viele Inkonsistenzen gibt.	1	2	3	4	5
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute die Hilfestellung schnell zu beherrschen lernen.	1	2	3	4	5
Ich empfinde die Benutzung der Hilfestellung als sehr umständlich.	1	2	3	4	5
Ich habe mich bei der Nutzung der Hilfestellung sehr sicher gefühlt.	1	2	3	4	5
Ich musste eine Menge lernen, bevor ich mit der Hilfestellung arbeiten konnte.	1	2	3	4	5



Studienteilnehmer/-innen gesucht

Belastungen und Beanspruchungen bei Montagetätigkeiten

Was sind unsere Ziele?

- vergleichende Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei der Bearbeitung von Montageaufgabe mit und ohne digitalem Assistenzsystem
- Vorschläge zu konkreten Empfehlungen für die Entwicklung von digitalen Assistenzsystemen in der Montage

Was ist Ihre Aufgabe?

- Tragen einer VR-Brille (virtual reality) und die Bearbeitung einfacher Montageaufgaben in einer virtuellen Umgebung
- Tragen eines EKG-Messgerätes und die Beantwortung von standardisierten arbeitspsychologischen Fragebögen
- Zeitaufwand ca. 2 Stunden
- Der Versuch findet in der **Schilfbreite 3, 39120 Magdeburg** statt (LIVINGSOLIDS GmbH)

Was bieten wir Ihnen?

- kostenfreie Untersuchung des Herz-Kreislaufsystems und der Augen und mit individueller Auswertung der Ergebnisse
- Wir garantieren den streng vertraulichen Umgang mit den erhobenen Daten. Es können keine Rückschlüsse auf Einzelpersonen geschlossen werden. Die Daten dienen nur Forschungszwecken und Ihrem persönlichen Gebrauch.
- Aufwandsentschädigung von pauschal 15 € / Anrechnung von Versuchspersonenstunden

Melden Sie sich gerne bei uns!
Wir suchen Probanden/-innen im Alter von 18 - 67 Jahren ohne Stoffwechselerkrankungen und Herzrhythmusstörungen



Kontakt:
Für die Vereinbarung des Untersuchungstermins oder Fragen zur Studie wenden Sie sich bitte an:
Annemarie Minow
Bereich Arbeitsmedizin (Haus 20, Zi. 311), Medizinische Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Leipziger Straße 44, 39120 Magdeburg
Tel.: 0391 67-25126 oder E-Mail: annemarie_minow@med.ovgu.de

Tel.:0391 67-25126
annemarie_minow@med.ovgu.de

A13: Probandeninformation zum User-Test (VR)

Sehr geehrte(r) Studienteilnehmer(in),

mit diesem Schreiben möchten wir Sie über die Studie „Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz (User-Test)“ informieren und Sie um Ihre Einwilligung zur Teilnahme an diesem Forschungsvorhaben bitten. Lesen Sie die Information bitte sorgfältig durch.

Falls Sie über diese Information hinaus noch weitere Fragen zur Studie haben, beantworten wir Ihnen diese gerne.

Ziel dieser Studie ist es, die Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Arbeitspersonen bei der Anwendung eines Assistenzsystems bei industriellen Montageprozessen zu analysieren, die dabei entstehenden Arbeitsbelastungen an den Arbeitsplätzen und die daraus resultierenden Beanspruchungsfolgen zu beurteilen sowie die Akzeptanz zu erfassen. Die Belastungs-Beanspruchungsanalyse wird bei Montageprozessen mit und ohne 3D-basierte Assistenztechnologien durchgeführt und vergleichend ausgewertet.

Im Rahmen der Untersuchung wird Ihr subjektives Beanspruchungsempfinden mithilfe von Fragebögen und die objektive Beanspruchung mittels physiologischer Parameter ermittelt. Dabei wird bei Ihnen eine EKG-Aufnahme mittels eines EKG-Rekorders Medilog Fa. Schiller erfolgen. Aus der EKG-Aufzeichnung wird dann mittels mathematischer Methoden die Herzfrequenzvariabilität (HRV) berechnet, die die Änderung des zeitlichen Abstandes zwischen zwei Herzschlägen beschreibt. Die Änderung dieser Abstände ist eine Fähigkeit des vegetativen Nervensystems, sich an bestimmte Situationen anzupassen.

So reagiert der Organismus zum Beispiel auf Stress mit einer Reduzierung der HRV, bei Beruhigung der Situation erhöht sich die HRV wieder. Dabei handelt es sich um einen wichtigen Kompensationsmechanismus des Körpers.

Der komplette Versuch dauert ca. 2 Stunden. Zu Beginn werden einige Fragen zur Person (soziodemografische Daten) gestellt, eine augenärztliche Statusuntersuchung wird durchgeführt und Fragebögen zur Selbsteinschätzung Ihrer momentanen subjektiven Beanspruchung ausgehändigt. Sie trainieren im Anschluss die Montage eines Bauteils.

Danach werden Sie, nach einer kurzen Ruhepause, in zwei Durchläufen Montageaufgaben in einer virtuellen Umgebung bearbeiten.

NICHT die VR-Brille (VR: virtual reality) stellt das zu beurteilende Assistenzsystem dar, sondern das System, welches Ihnen in der virtuellen Umgebung präsentiert wird.

Während der Bearbeitung des Montageauftrags werden Videoaufnahmen³¹ gemacht und, wie bereits beschrieben, nicht-invasiv physiologische Parameter (Herzfrequenzvariabilität) erhoben. Nach der Bearbeitung der Montageaufgaben erfolgt das Ausfüllen von Fragebögen zu Ihrem Beanspruchungsempfinden und Ihrer Beurteilung des Assistenzsystems. Der Versuch endet mit einer kurzen Ruhephase.

Bitte nehmen Sie nur an der Studie teil, wenn Sie momentan nicht unter besonderen physischen oder psychischen Belastungen stehen. Die Erhebung der Daten und Parameter erfolgt nach standardisierten Methoden. Sämtliche Daten werden anonymisiert und streng vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig und kann jederzeit ohne Angabe der Gründe abgebrochen werden. Durch einen Studienabbruch entstehen Ihnen keinerlei Nachteile.

³¹ Die Videoaufnahmen werden lediglich zur Auswertung der Leistungsparameter und nur für die dargestellten Forschungszwecke verwendet. Die Daten werden nach Abschluss des Projektes unwiederbringlich gelöscht.

A14: User-Test (VR und Real): Soziodemografische Angaben und Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen

Mit folgenden Fragen möchten wir einige Informationen zu Ihrer Person erhalten, die für die Auswertung der Untersuchung von Bedeutung sein können. Bitte beantworten Sie alle Fragen wahrheitsgemäß.

1. Geburtsdatum _____

2. Geschlecht weiblich männlich divers

3. Gewicht in kg _____

4. Größe in cm _____

5. Tragen Sie Kontaktlinsen oder eine Brille? ja nein

6. Brillendaten R _____ L _____

7. Augenerkrankungen ja nein

7.1 Falls ja, welche? _____

8. Haben Sie bereits Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen (z. B. Smartphone, Tablet, Datenbrille, Smartwatch, Datenhandschuh) ?

- Ja, ich arbeite täglich mit digitalen Assistenzsystemen.
- Ja, ich nutze diese Systeme oft.
- Ja, ich habe digitale Assistenzsysteme bereits ausprobiert.
- Nein, aber ich habe schon von solchen Systemen gehört.
- Nein, ich habe noch nie von solchen Systemen gehört.

8.1 Haben Sie Erfahrungen mit Virtual-Reality-Brillen (z. B. bei Videospiele)? Wenn ja, welche?

9. Wie viele Stunden verbringen Sie am Tag durchschnittlich am Bildschirm (PC, Laptop, Tablet, Smartphone,...)? Bitte denken Sie sowohl an den Arbeitsbereich als auch an den Hobbybereich.

10. Haben Sie im Moment körperliche Beschwerden? Wenn ja, welche?

11. Nehmen Sie regelmäßig Medikamente ein? Wenn ja, welche?

12. Rauchen Sie zurzeit mehr als 20 Zigaretten pro Tag?

ja nein

13. Trinken Sie täglich mehr als zwei Flaschen Bier (oder zwei Gläser Wein) an fünf aufeinanderfolgenden Tagen?

ja nein

14. Leiden Sie unter einer der folgenden Erkrankungen?

Bluthochdruck

- Ja, und ich nehme Medikamente dagegen ein
- Ja, aber ich nehme keine Medikamente dagegen ein
- Nein

Diabetes mellitus

- Ja, und ich nehme Medikamente dagegen ein
- Ja, aber ich nehme keine Medikamente dagegen ein
- Nein

Herzrhythmusstörung

- Ja, und ich nehme Medikamente dagegen ein
- Ja, aber ich nehme keine Medikamente dagegen ein
- Nein

Mündliche Erläuterung

Sie werden gleich mit einer Virtual-Reality-Brille, kurz VR-Brille, arbeiten.

Wir verwenden das Modell HTV-Vive. An dieser Brille ist vorne ein Sensor angebracht, der Ihre Hände und deren Bewegungen erkennt und virtuell abbildet.

Wenn Sie die Brille gleich aufsetzen, werden Sie einen Montagearbeitsplatz wie diesen visualisiert bekommen. Die Brille sollte, wenn Sie diese gleich aufsetzen, gut sitzen. Sie sollte nicht drücken oder rutschen. Mit Klettverschlussgurten können wir das regulieren. Zudem sollten Sie das Bild scharf sehen können, falls nicht geben Sie mir bitte Bescheid.

Der Sensor hat, wie Sie auf dem Bild sehen, einen bestimmten Arbeitsbereich in dem er die Bewegung Ihrer Hände erkennt. Wenn Sie die Hände sehr weit außen, bzw. sehr weit oben oder unten halten, kann der Sensor Ihre Bewegungen nicht erkennen.

Folie

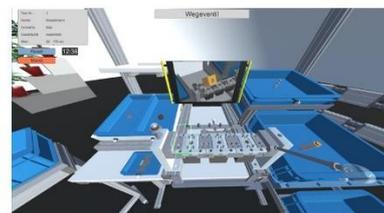
Bedienungsanleitung



Aufbau



Erste Schritte



1. Die Brille muss richtig auf dem Kopf sitzen
2. Das Bild muss scharf sein

Arbeitsbereich des Sensors



Zur Erkennung der Greifbewegungen ist es günstig, wenn Sie etwas seitlich greifen. Bei langgestreckten Armen besteht die Gefahr, dass der Arm die eigene Hand verdeckt und somit das Greifen von Bauteilen vom Sensor nicht erkannt wird.

First-Person-Ansicht

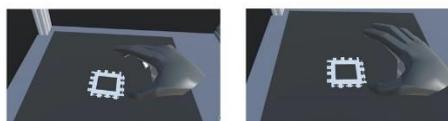


Selbstverdeckung der Hand

Klare Erfassung der Hand

Zur Erkennung des Greifens ist es günstiger mit fünf als mit zwei Fingern zuzufassen (siehe kurze Videosequenzen). Die Hand wird grün, wenn Sie ein Bauteil gegriffen haben.

Greifen eines Teils



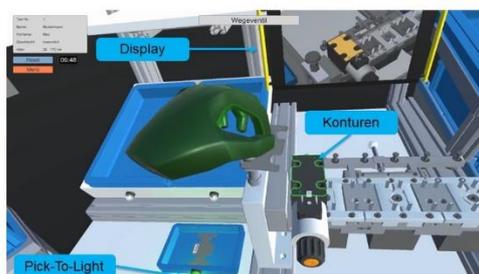
Mit zwei Fingern zuzufassen
schwierig

Mit fünf Fingern zuzufassen
einfacher

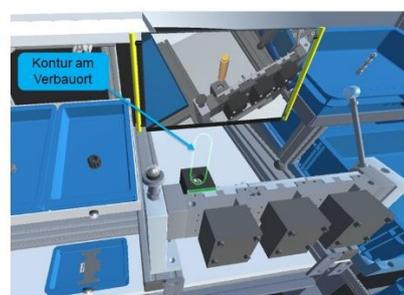
Die Hand ändert ihre Farbe, wenn ein Bauteil gegriffen wird.

Sie werden drei Assistenzsysteme präsentiert bekommen. Das Display steht Ihnen in beiden Durchgängen zur Verfügung und spielt kurze Videosequenzen des nächsten Montageschrittes ab. Die Höhe und Entfernung des Displays können Sie vor Beginn der Montageaufgabe individuell einstellen. Sie werden in zwei Durchgängen einmal mit einem Pick-to-Light-System arbeiten und einmal werden Ihnen AR-Konturen präsentiert.

Assistenzsysteme (AS)



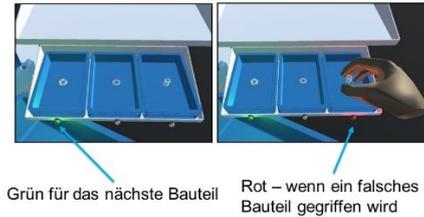
AS: AR-Brille (Konturen)



Die Konturen am Verbauort stellen die Simulation einer Augmented-Reality (kurz AR)-Brille dar.

AS: Pick-To-Light

Das Pick-to-Light-System zeigt Ihnen mit Hilfe eines grünen Lämpchens, welches Bauteil Sie als nächstes verbauen sollen. Sollten Sie fälschlicherweise in eine falsche Kiste greifen, leuchtet eine rote Lampe auf.



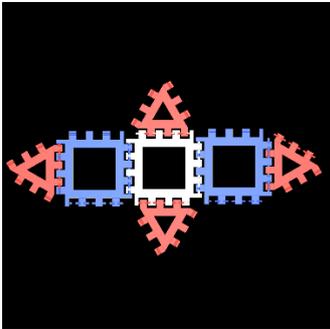
Sie bekommen gleich im Anschluss die Möglichkeit das Greifen von Bauteilen zu üben.

Haben Sie zu dieser kurzen Einführung Fragen?

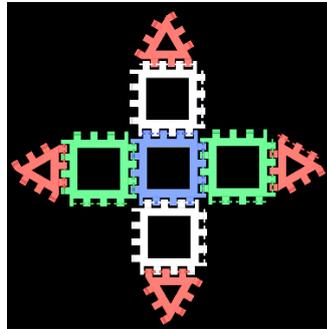
Haben Sie Fragen ?

A16: Geometrische Figuren aus User-Test (VR)

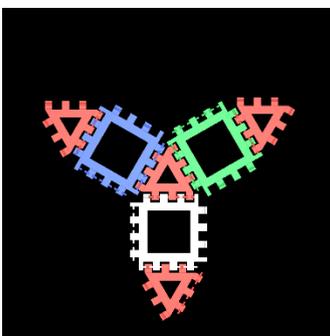
Variante 1, Aufgabe 1



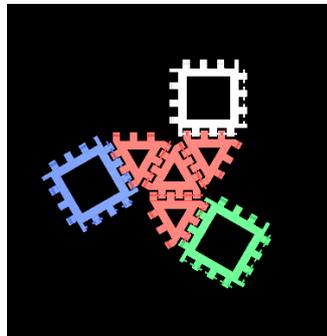
Variante 2, Aufgabe 1



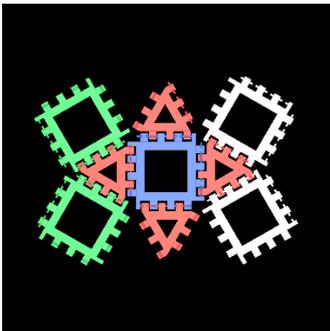
Variante 1, Aufgabe 2



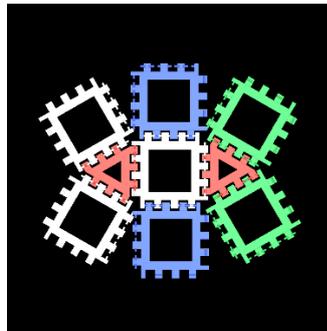
Variante 2, Aufgabe 2



Variante 1, Aufgabe 3

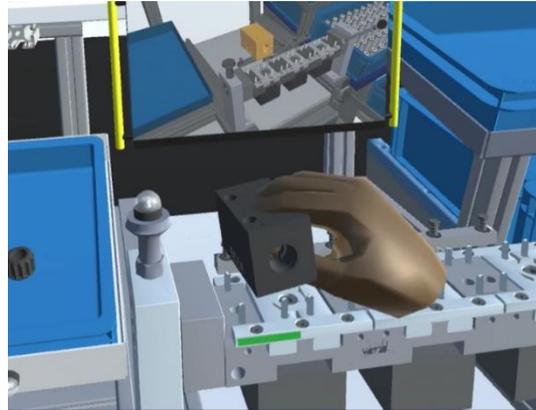


Variante 2, Aufgabe 3

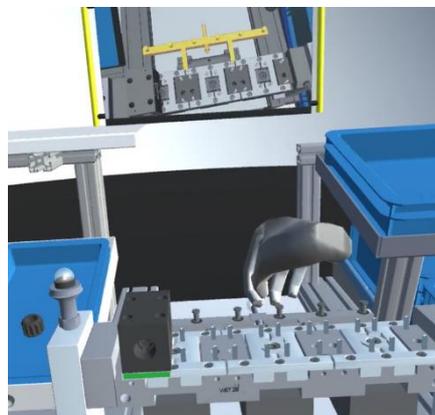


A17: Schrittweiser Zusammenbau des Wegeventils (User-Test VR)

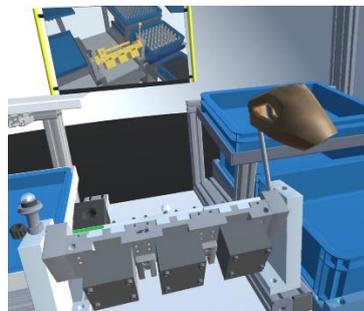
1. Das Gehäuse auf der Vorrichtung platzieren.



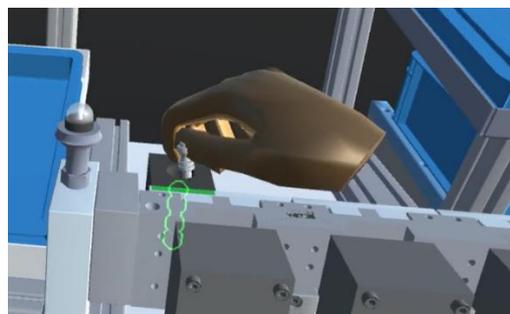
2. Die Kolbensicherung schließen.



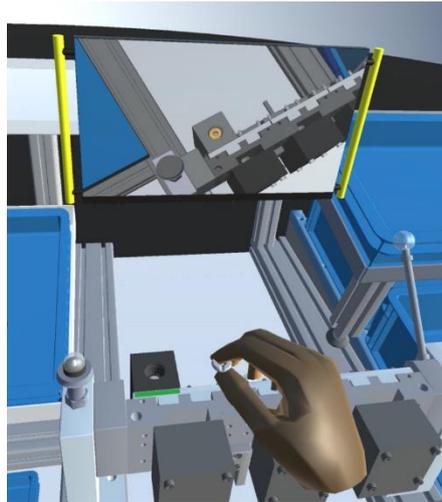
3. Den Hebel nach vorn drehen.



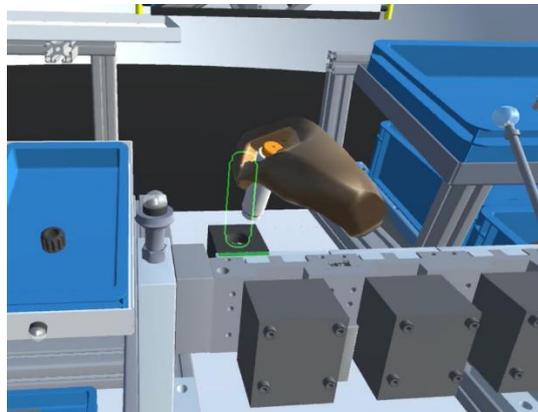
4. Den Kolben in das Gehäuse einfügen.



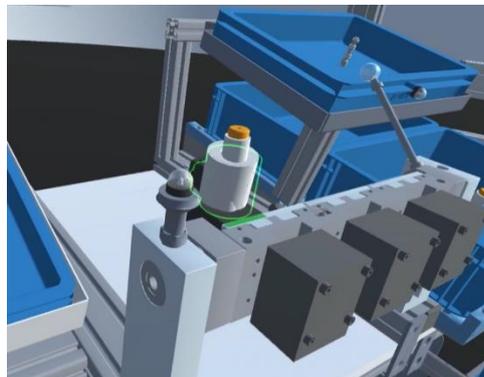
5. Den Hubbegrenzer in das Gehäuse einfügen.



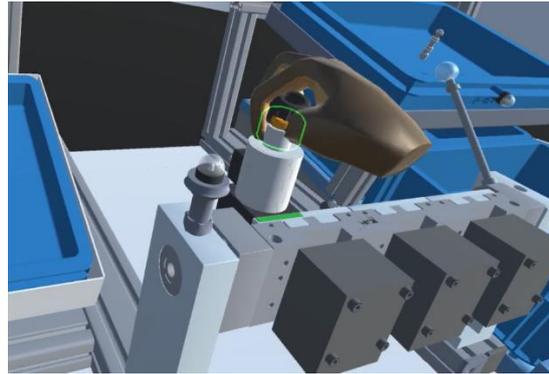
6. Das Ankerrohr in das Gehäuse einfügen.



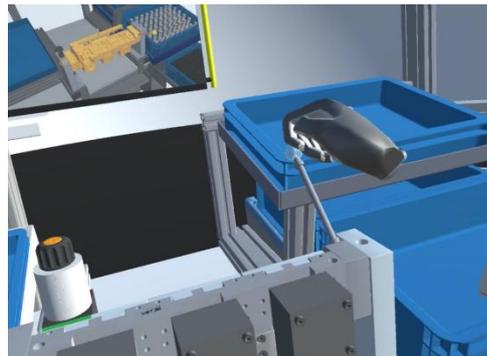
7. Die Spule auf das Ankerrohr ablegen.



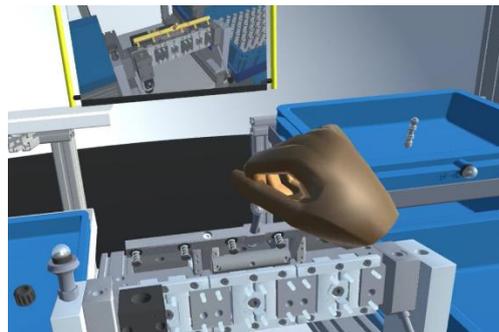
8. Die Rändelmutter am Ankerrohr festziehen.



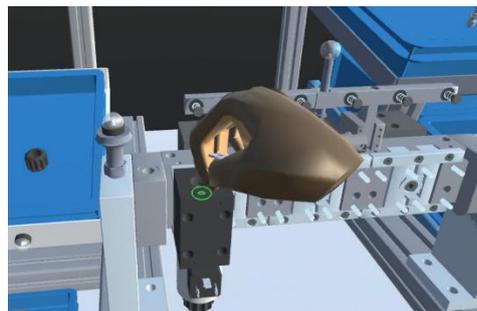
9. Den Hebel zurück nach unten drehen.



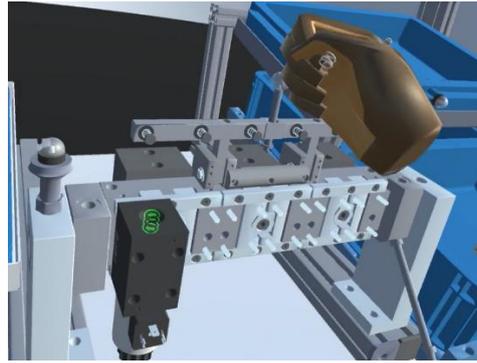
10. Die Kolbensicherung öffnen.



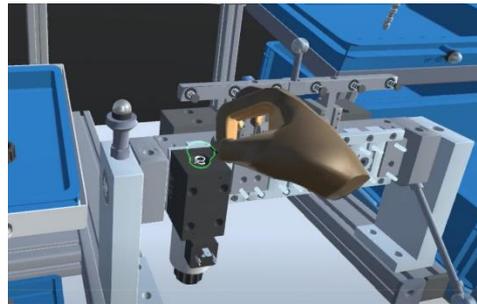
11. Die Scheibe in das Gehäuse einfügen.



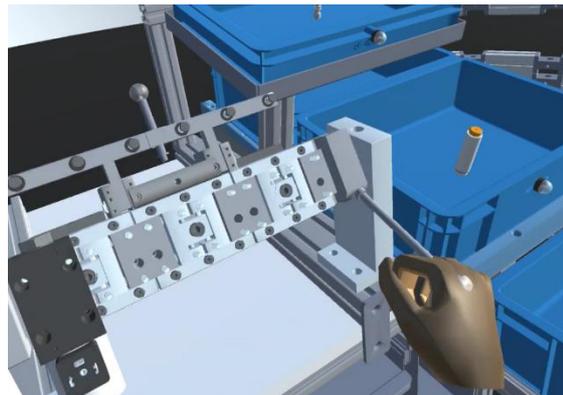
12. Die Feder in das Gehäuse einfügen.



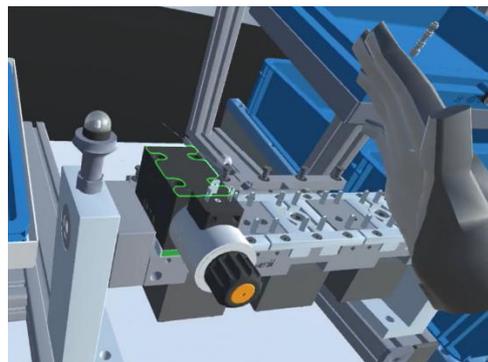
13. Die Endkappe am Gehäuse festziehen.



14. Den Hebel zu Ausgangsposition drehen.



15. Das Typenschild auf das Gehäuse platzieren.



A19: Fragebogen zur SUS (User-Test VR)

Bitte geben Sie im Folgenden an, inwiefern Sie das soeben genutzte virtuelle Assistenzsystem in Hinblick auf folgende Aussagen einschätzen.

	stimme gar nicht zu				stimme voll zu
Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.	1	2	3	4	5
Ich empfinde das System als unnötig komplex.	1	2	3	4	5
Ich empfinde das System als einfach zu benutzen.	1	2	3	4	5
Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.	1	2	3	4	5
Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind	1	2	3	4	5
Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.	1	2	3	4	5
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.	1	2	3	4	5
Ich empfinde die Benutzung als sehr umständlich.	1	2	3	4	5
Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.	1	2	3	4	5
Ich musste eine Menge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.	1	2	3	4	5

A20: Fragebogen zum Technology Acceptance Model (TAM) – ausgewählte Skalen

Bitte kreuzen Sie die folgenden Fragen in Hinblick auf das eben verwendete Assistenzsystem an.

	(1) stimme gar nicht zu	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) stimme voll und ganz zu
Wahrgenommene Nützlichkeit							
1. Die Nutzung des Assistenzsystems verbessert meine Arbeitsleistung.							
2. Die Nutzung des Assistenzsystems erhöht die Produktivität meiner Arbeit.							
3. Die Nutzung des Assistenzsystems steigert die Effektivität meiner Arbeit.							
4. Ich finde das Assistenzsystem nützlich für meine Arbeit.							
Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit							
1. Der Umgang mit dem Assistenzsystem ist für mich klar und verständlich.							
2. Der Umgang mit dem Assistenzsystem erfordert von mir keine große geistige Anstrengung.							
3. Ich finde das Assistenzsystem leicht zu bedienen.							
4. Ich finde, das Assistenzsystem macht ohne Probleme das, was ich möchte.							

A21: ISONORM-Fragebogen (short)

Die folgenden Beschreibungen weisen immer folgende Form auf:

Das AS ...	---	--	-	-/+	+	++	+++	Das AS ...
ist schlecht.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ist gut.				

In diesem Beispiel wird danach gefragt, wie gut, bzw. wie schlecht das Assistenzsystem (AS) ist.

Der Benutzer beurteilt in diesem Fall das AS zwar als gut, sieht jedoch noch Verbesserungsmöglichkeiten.

Bitte kreuzen Sie an, wie Sie das Assistenzsystem beurteilen.

Das AS ...	---	--	-	-/+	+	++	+++	Das AS ...
aa1 bietet nicht alle Funktionen, um die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.	<input type="checkbox"/>	bietet alle Funktionen, um die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.						
aa2 erfordert überflüssige Eingaben.	<input type="checkbox"/>	erfordert keine überflüssigen Eingaben.						
aa3 ist schlecht auf die Anforderungen der Arbeit zugeschnitten.	<input type="checkbox"/>	ist gut auf die Anforderungen der Arbeit zugeschnitten.						
sb1 liefert in unzureichendem Maße Informationen darüber, welche Eingaben zulässig oder nötig sind.	<input type="checkbox"/>	liefert in zureichendem Maße Informationen darüber, welche Eingaben zulässig oder nötig sind.						
sb2 bietet auf Verlangen keine situationsspezifischen Erklärungen, die konkret weiterhelfen.	<input type="checkbox"/>	bietet auf Verlangen situationspezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.						

sb3	bietet von sich aus keine situationspezifischen Erklärungen, die konkret weiterhelfen.	<input type="checkbox"/>	bietet von sich aus situationspezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.					
sk1	erzwingt eine unnötig starre Einhaltung von Bearbeitungsschritten.	<input type="checkbox"/>	erzwingt keine unnötig starre Einhaltung von Bearbeitungsschritten.					
sk3	erzwingt unnötige Unterbrechungen der Arbeit.	<input type="checkbox"/>	erzwingt keine unnötigen Unterbrechungen der Arbeit.					
ek1	erschwert die Orientierung, durch eine uneinheitliche Gestaltung.	<input type="checkbox"/>	erleichtert die Orientierung, durch eine einheitliche Gestaltung.					
ek2	informiert in unzureichendem Maße über das, was es gerade macht.	<input type="checkbox"/>	informiert in ausreichendem Maße über das, was es gerade macht.					
ek3	lässt sich nicht durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.	<input type="checkbox"/>	lässt sich durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.					
ft1	liefert schlecht verständliche Fehlermeldungen.	<input type="checkbox"/>	liefert gut verständliche Fehlermeldungen.					
ft2	erfordert bei Fehlern im Großen und Ganzen einen hohen Korrekturaufwand.	<input type="checkbox"/>	erfordert bei Fehlern im Großen und Ganzen einen geringen Korrekturaufwand.					
ft3	gibt keine konkreten Hinweise zur Fehlerbehebung.	<input type="checkbox"/>	gibt konkrete Hinweise zur Fehlerbehebung.					
lk2	lässt sich schlecht an meine persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen.	<input type="checkbox"/>	lässt sich gut an meine persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen.					
lk3	lässt sich - im Rahmen seines Leistungsumfangs - von mir schlecht für unterschiedliche Aufgaben passend einrichten.	<input type="checkbox"/>	lässt sich - im Rahmen seines Leistungsumfangs - von mir gut für unterschiedliche Aufgaben passend einrichten.					

lf1	erfordert viel Zeit zum Erlernen.	<input type="checkbox"/>	erfordert wenig Zeit zum Erlernen.						
lf2	erfordert, dass ich mir viele Details merken muss.	<input type="checkbox"/>	erfordert nicht, dass ich mir viele Details merken muss.						
lf3	ist schlecht ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.	<input type="checkbox"/>	ist gut ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.						

Weitere Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge für das Assistenzsystem können Sie im folgenden Feld eintragen.

A22: Probandeninformation zum User-Test (Real)

Sehr geehrte(r) Studienteilnehmer(in),

mit diesem Schreiben möchten wir Sie über die Studie „Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz“ (IFF-Studie) informieren und Sie um Ihre Einwilligung zur Teilnahme an diesem Forschungsvorhaben bitten. Lesen Sie die Information bitte sorgfältig durch. Falls Sie über diese Information hinaus noch weitere Fragen zur Studie haben, beantworten wir Ihnen diese gerne.

Ziel dieser Studie ist es, die Gebrauchstauglichkeit eines Assistenzsystems bei industriellen Montageprozessen zu beurteilen. Ebenso sollen die daraus resultierenden Beanspruchungsfolgen gemessen werden. Die Belastungs-Beanspruchungsanalyse wird bei Montageprozessen mit und ohne 3D-basierte Assistenztechnologien durchgeführt und vergleichend ausgewertet.

Im Rahmen der Untersuchung wird Ihr subjektives Beanspruchungsempfinden mithilfe eines kurzen Fragebogens und die objektive Beanspruchung mittels physiologischer Parameter ermittelt. Dabei wird bei Ihnen eine EKG-Aufnahme mittels eines EKG-Rekorders Medilog Fa. Schiller erfolgen. Aus der EKG-Aufzeichnung wird dann mittels mathematischer Methoden die Herzfrequenzvariabilität (HRV) berechnet, die die Änderung des zeitlichen Abstandes zwischen zwei Herzschlägen beschreibt. Die Änderung dieser Abstände ist eine Fähigkeit des vegetativen Nervensystems, sich an bestimmte Situationen anzupassen. So reagiert der Organismus zum Beispiel auf Stress mit einer Reduzierung der HRV, bei Beruhigung der Situation erhöht sich die HRV wieder. Dabei handelt es sich um einen wichtigen Kompensationsmechanismus des Körpers.

Der komplette Versuch dauert ca. 45-60 min und findet im Fraunhofer IFF (Sandtorstraße 22, 39106 Magdeburg) statt. Zu Beginn werden einige Fragen zur Person (soziodemografische Daten) gestellt und eine ophthalmologische Statusuntersuchung wird durchgeführt. Danach werden Sie, nach einer Einführung in die Bauteilmontage, ein Hydraulikventil montieren.

Während der Montage sollen Sie „**laut denken**“, d.h. sie sollen nicht nur eine vorgegebene Aufgabe bearbeiten, sondern **auch davon berichten, was sie gerade denken**. Wichtig ist dabei, dass **alle Gedanken** genannt werden, auch jene, die Ihnen vielleicht irrelevant erscheinen. Stellen Sie sich einfach vor, dass Sie allein im Raum sind und mit sich selbst sprechen. Das können Aussagen sein, wie

„... *jetzt überlege ich gerade wie ...*“

„... *das Programm macht auf mich einen überladenen Eindruck ...*“

„... *auf dem Bildschirm suche ich ...*“

„... *nun wird es interessant ...*“

„... *durch die Rückmeldung des Programms bin ich verunsichert ...*“

Während der Bearbeitung des Montageauftrags werden Bild- und Videoaufnahmen³² gemacht und, wie bereits beschrieben, nicht-invasiv physiologische Parameter (Herzfrequenzvariabilität) erhoben. Nach der Bearbeitung der Montageaufgaben erfolgt das Ausfüllen eines kurzen Fragebogens zu Ihrem Beanspruchungsempfinden. Der Versuch endet mit einer 6-minütigen Ruhephase und einem Interview.

³² Die Bild- und Videoaufnahmen werden nur für die dargestellten Forschungszwecke verwendet. Die Daten werden nach Abschluss des Projektes unwiederbringlich gelöscht.

Hinweise

Bitte nehmen Sie nur an der Studie teil, wenn Sie momentan nicht unter besonderen physischen oder psychischen Belastungen stehen.

Die Erhebung der Daten und Parameter erfolgt nach standardisierten Methoden. Sämtliche Daten werden anonymisiert und streng vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig und kann jederzeit ohne Angabe von Gründen abgebrochen werden. Durch einen Studienabbruch entstehen Ihnen keinerlei Nachteile.

A23: Interviewleitfaden zum User-Test (Real)

THEMA	MÖGLICHE FRAGEN
EINSTIEG	<ul style="list-style-type: none"> • Was sagen Sie spontan zum Assistenzsystem?
STÄRKEN / SCHWÄCHEN	<ul style="list-style-type: none"> • Was sind aus Ihrer Sicht Stärken des Assistenzsystems? • Was sind aus Ihrer Sicht Schwächen des Assistenzsystems? • Was waren unverständliche Schritte?
ANZEIGEN(DESIGN)	<ul style="list-style-type: none"> • Wie haben Sie das Design (Farbe, Schriftgröße, Anzeigen etc.) empfunden?
INFORMATION-ÜBERSICHT UND -FÜLLE	<ul style="list-style-type: none"> • Wie empfanden Sie die technischen Beschreibungen? • Wie empfanden Sie die Informationsdarstellung? • Waren die Informationen (zu) ausführlich?
GEFÜHLE / USER EXPERIENCE	<ul style="list-style-type: none"> • Wie war Ihre Gefühlslage während der Montage (Spaß, Anspannung, Unsicherheit, Frustration)?
ANSTRENGUNG	<ul style="list-style-type: none"> • Wie anspruchsvoll fanden Sie die Aufgabe? • Glauben Sie sie hätten die Montage auch ohne Assistenzsystem bewältigen können?
LERNEFFEKT	<ul style="list-style-type: none"> • Wie schätzen Sie den Lerneffekt mit dem Assistenzsystem ein?
VERBESSERUNGSVORSCHLÄGE	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Verbesserungsvorschläge haben Sie?