

Nils Darwin Abele

**Entwicklung und Evaluierung eines
wissensbasierten Cyber-Physischen
Produktionssystems zur Unterstützung
industrieller Rüstprozesse
unter Berücksichtigung ergonomischer
und nutzerzentrierter Aspekte**

Nils Darwin Abele

**Entwicklung und Evaluierung eines
wissensbasierten Cyber-Physischen
Produktionssystems zur Unterstützung
industrieller Rüstprozesse
unter Berücksichtigung ergonomischer
und nutzerzentrierter Aspekte**

Entwicklung und Evaluierung eines wissensbasierten
Cyber-Physischen Produktionssystems zur Unterstützung
industrieller Rüstprozesse unter Berücksichtigung
ergonomischer und nutzerzentrierter Aspekte

DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
M.Sc. Nils Darwin Abele

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2023

Dissertation 2023
angenommen von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Siegen

- 1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Kluth (Universität Siegen)**
- 2. Gutachter: Prof. Dr. rer. oec. Marcus Schweitzer (Universität Siegen)**

Datum der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Impressum

Druck und Bindung:

UniPrint, Universität Siegen

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier

Siegen 2024: *universi* – Universitätsverlag Siegen
www.uni-siegen.de/universi

ISBN 978-3-96182-168-6

Online-Version inklusive Anhang unter:

doi.org/10.25819/ubsi/10476

Die Publikation erscheint unter der
Creative Commons Lizenz CC-BY-SA



*Meiner Frau
und
meinen Söhnen
gewidmet.*

*In Gedenken an
meinen Schwiegervater.*

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand auf Grundlage des durch die Europäische Union sowie den Europäischen Fonds für regionale Entwicklungen des Landes Nordrhein-Westfalen geförderten Forschungsprojektes „Cyberrüsten 4.0“ (EFRE-0800263). Herr *Prof. Dr.-Ing. Karsten Kluth*, Leiter des Fachgebietes Arbeitswissenschaft/Ergonomie der Universität Siegen, eröffnete mir im Zuge des Forschungsvorhabens die Möglichkeit, mich mit der Entwicklung und Evaluierung eines wissens- und „Augmented Reality“-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems zur Unterstützung industrieller Rüstprozesses unter Berücksichtigung ergonomischer und nutzerzentrierter Aspekte kritisch auseinanderzusetzen. Trotz seiner zahlreichen Verpflichtungen, u. a. als Vorsitzender des Praktikantenamtes des Departments Maschinenbau der Universität Siegen, förderte Herr Kluth meine wissenschaftliche Entwicklung durch seine kompetente und intensive Begleitung bei der Abfassung von Veröffentlichungen sowie der Dissertationsschrift in einem überaus umfangreichen Maße. Dabei wurde mir seine Unterstützung in einer offenen und freundlichen Arbeitsatmosphäre, die stets mit einer klaren arbeitswissenschaftlichen Zielstellung verbunden war, vollumfassend zuteil. Dafür bedanke ich mich von ganzem Herzen.

Meine wissenschaftliche Tätigkeit begann am Lehrstuhl für Technologiemanagement der Universität Siegen unter der Leitung von Herrn *Prof. Dr. rer. oec. Marcus Schweitzer*, der im Zuge des Promotionsverfahrens das Korreferat übernahm. Bei ihm möchte ich mich in gleicher Weise bedanken. Seine fortwährende Diskussionsbereitschaft und Begeisterungsfähigkeit gepaart mit seiner fachlichen Expertise auf dem Gebiet der Prozessgestaltung in Anbetracht verhaltenensorientierter, empirischer Fragestellungen sowie qualitativer und quantitativer Methoden ebneten den Weg für die erfolgreiche Anfertigung dieser Arbeit.

Herrn *Prof. Dr. phil. habil. Oliver Sträter*, Leiter des Fachgebietes Arbeits- und Organisationspsychologie der Universität Kassel, danke ich für die Übernahme der Aufgaben als Prüfer des Promotionsverfahrens. Mein Dank gebührt ebenfalls Herrn *Prof. Dr.-Ing. Peter Kraemer*, Leiter des Lehrstuhls für Mechanik mit Schwerpunkt Schädigungsüberwachung (Structural Health Monitoring), der als Prüfer und Leiter der Promotionskommission fungierte.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei allen ehemaligen Kollegen und Mitarbeitern, dem gesamten Cyberrüsten-4.0-Konsortium, das durch den Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Siegen in Person von Herrn *Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel* und Herrn *Dr.-Ing. Christopher Kuhnhen* geführt wurde, sowie sämtlichen beteiligten Probanden, Studienarbeitern, Bacheloranden und Masteranden. In diesem Zusammenhang möchte ich besonders die sehr erfolgreiche, angenehme und freundschaftliche Zusammenarbeit mit Herrn *M.Sc. Sven Hoffmann*, Mitarbeiter des Lehrstuhls Wirtschaftsinformatik und Neue Medien der Universität Siegen und derzeitiger Geschäftsführer der ZDW Südwestfalen GmbH, hervorheben.

Die liebevolle und uneingeschränkte Unterstützung meiner Frau, Familie und Freunde haben überhaupt erst die Voraussetzungen für das Entstehen dieser Arbeit geschaffen. Meine beiden Söhne gaben mir außerdem stets das Gefühl, auf dem richtigen Weg zu sein. Ich danke euch für alles!

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung und Problemstellung	7
2 Industrielle Rüstprozesse am Beispiel des Rotationszugbiegens	12
3 Technologie-Entwicklung im Produktionsprozess	18
3.1 Augmented Reality (AR).....	18
3.2 Cyber-Physische Produktionssysteme	20
3.3 Head-Mounted Displays bzw. Datenbrillen	22
3.3.1 Untersuchungsgegenstand Microsoft® „HoloLens“	23
3.3.2 Rechtliche Anforderungen für den Einsatz von Head-Mounted Displays bzw. Datenbrillen	25
4 Nutzerzentriertes Design cyber-physischer Hilfsmittel für wissensintensive (Rüst-)Prozesse	28
4.1 Stand der Forschung zum Transfer von Wissen und Erfahrung.....	28
4.2 Nutzung von AR-Technologien und Cyber-Physischen Produktionssystemen	32
4.3 Modellbasiertes Design für den Wissenstransfer	36
5 Ergonomie im industriellen (Rüst-)Kontext	40
5.1 Das Belastungs-Beanspruchungskonzept	41
5.2 Arbeitsphysiologische Beanspruchungsindikatoren und deren Ermittlung.....	45
5.2.1 <i>Elektromyographie</i>	47
5.2.2 <i>Muskelphysiologie</i>	48
5.2.3 <i>Physiologische Grundlagen zur Thermoregulation</i>	51
5.3 Arbeitspsychologische Beanspruchungsermittlung.....	53
5.4 Verfahren zur ergonomischen Bewertung von Arbeit.....	55
5.4.1 <i>Manuelle Lastenhandhabung</i>	56
5.4.2 <i>Körperhaltung</i>	56
5.4.3 <i>Aktionskräfte</i>	57
5.4.4 <i>Repetitive Tätigkeiten</i>	57
5.4.5 <i>Auswahl eines Arbeitsplatzbewertungsverfahrens</i>	58
5.5 Interaktions-ergonomische Gestaltungsanforderungen und Kompatibilität.....	60
5.5.1 <i>Menschbezogene Aspekte</i>	61
5.5.2 <i>Arbeitsmittelbezogene Aspekte</i>	62
5.6 Ergonomische und praxisbezogene Studien zum Einsatz AR-basierter Datenbrillen.....	65
5.6.1 <i>Physische Einflussfaktoren</i>	66
5.6.2 <i>Psychische Einflussfaktoren</i>	67

6	Forschungshypothesen.....	70
7	Versuchsdesign und Methode	73
7.1	Beschreibung des Versuchsdesigns.....	74
7.1.1	<i>Empirische Feldstudie und Evaluierung</i>	75
7.1.2	<i>Teilstudie 1 („HoloErgo“)</i>	82
7.1.3	<i>Teilstudie 2 („HoloErgo 2.0“)</i>	91
7.1.4	<i>Probandenkollektiv</i>	97
7.2	Objektivierung von Gefährdungen sowie Belastung und Beanspruchung.....	106
7.2.1	<i>Arbeitsplatzbewertungsverfahren</i>	107
7.2.1.1	<i>Leitmerkalmethode</i>	107
7.2.1.2	<i>Ergonomic Assessment Worksheet</i>	111
7.2.2	<i>Objektive Messmethoden</i>	118
7.2.2.1	<i>Messtechnische Erfassung der Elektromyographischen Aktivität mittels Oberflächen-Elektromyographie</i>	118
7.2.2.2	<i>Thermografische Messsystematik</i>	129
7.3	Methoden zur Erfassung der subjektiven Wahrnehmung	130
7.3.1	<i>Organisation der Befragung</i>	130
7.3.2	<i>Subjektives physisches Beanspruchungserleben</i>	132
7.3.3	<i>Rating Scale of Mental Effort</i>	133
7.3.4	<i>NASA Task Load Index</i>	133
7.3.5	<i>Visual Fatigue Questionnaire</i>	133
7.3.6	<i>Abschlussbefragung</i>	134
7.4	Statistische Auswertungen.....	134
7.4.1	<i>Statistische Hypothesen</i>	136
7.4.2	<i>Statistische Testverfahren</i>	137
7.4.3	<i>Festlegung des Signifikanzniveaus und Entscheidung zwischen den Hypothesen</i>	145
7.4.4	<i>Ausgewählte Beispiele zu statistischen Testverfahren</i>	146
8	Ergebnisdarstellung	152
8.1	Wissensrelevanz in Bezug auf industrielle Rüstprozesse.....	152
8.1.1	<i>Charakteristik industrieller Rüstprozesse</i>	153
8.1.2	<i>Abhängigkeit von Wissen</i>	158
8.1.3	<i>Wissenstransfermodell im Rahmen industrieller Rüstprozesse</i>	159
8.2	Design eines AR-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems für industrielle Rüstprozesse	162
8.2.1	<i>Ableitung von Designimplikationen</i>	162
8.2.2	<i>Technische Umsetzung der Designimplikationen</i>	171
8.2.3	<i>Technische Schnittstellen, Interface-Gestaltung und Workflow</i>	177
8.2.4	<i>Ergonomische Gestaltungsparameter und Kompatibilität</i>	179
8.3	Evaluierung eines AR-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems für industrielle Rüstprozesse in einer natürlichen Umgebung	188

8.4 Arbeitsplatzbewertung eines Rüstvorgangs anhand ausgewählter Verfahren.....	192
8.4.1 Leitmerkalmethode.....	193
8.4.2 Ergonomic Assessment Worksheet.....	199
8.5 Teilstudie 1 („HoloErgo“) – Evaluierung von physischen und psychischen Beanspruchungsindikatoren bei der Anwendung eines AR-basierter Head-Mounted Displays im Rahmen einfacher Montagetätigkeiten und statischer Blickpositionierungen.....	213
8.5.1 Objektive Beanspruchung.....	213
8.5.1.1 Elektromyographische Aktivität der Schulter-Nacken-Muskulatur.....	214
8.5.1.2 Wärmebildaufnahmen des Kopfbereiches.....	222
8.5.2 Subjektive Beurteilung der Arbeitsaufgaben.....	224
8.5.2.1 Subjektives physisches Beanspruchungserleben.....	224
8.5.2.2 Rating Scale of Mental Effort.....	229
8.5.2.3 NASA Task Load Index.....	230
8.5.2.4 Visual Fatigue Questionnaire.....	232
8.5.2.5 Abschlussbefragung.....	234
8.6 Teilstudie 2 („HoloErgo 2.0“) – Evaluierung von physischen und psychischen Beanspruchungsindikatoren sowie Leistungsparametern bei der Anwendung eines AR-basierten Head-Mounted Displays im Rahmen des Rüstvorgangs einer Rotationszugbiegemaschine.....	237
8.6.1 Objektive Beanspruchung.....	237
8.6.1.1 Elektromyographische Aktivität der Schulter-Nacken-Muskulatur.....	238
8.6.1.2 Wärmebildaufnahmen des Kopfbereiches.....	245
8.6.2 Subjektive Beurteilung der Arbeitsaufgaben.....	247
8.6.2.1 Subjektives physisches Beanspruchungserleben.....	247
8.6.2.2 Rating Scale of Mental Effort.....	251
8.6.2.3 NASA Task Load Index.....	252
8.6.2.4 Visual Fatigue Questionnaire.....	254
8.6.2.5 Abschlussbefragung.....	257
8.6.3 Leistungsbewertung.....	264
9 Diskussion der Ergebnisse.....	268
9.1 Nutzerzentrierte und ergonomische Gestaltung wissensbasierter Unterstützungssysteme.....	268
9.1.1 Aspekt „Wissen“.....	269
9.1.2 Aspekt „Design“.....	271
9.1.3 (Interaktions-)Ergonomie und Kompatibilität.....	274
9.2 Nutzungsinduzierte Beanspruchung durch AR-basierte Head-Mounted Displays.....	276
9.2.1 Risikobewertung bzw. Gefährdungsbeurteilung.....	276
9.2.2 Objektive und subjektive Muskelbeanspruchung sowie Komfortbeeinträchtigungen.....	278
9.2.3 Subjektives und kognitives Beanspruchungserleben.....	282
9.3 Auswirkungen des Unterstützungssystems auf die Leistung der Maschineneinrichter.....	286
9.4 Limitationen der Untersuchungen.....	292
9.5 Praktische Relevanz der Ergebnisse.....	296

10 Ausblick.....	301
11 Literaturverzeichnis.....	303
12 Anhang	338

Nomenklatur

Symbol	Bedeutung	Einheit
a	Unterer Randwert der EAWS-Skalierung	[-]
ADP	Adenosindiphosphat	[-]
AR	Augmented Reality	[-]
ATP	Adenosinriphosphat	[-]
b	Oberer Randwert der EAWS-Skalierung	[-]
b_i	Individuelle Beanspruchung	[-]
B	Belastung	[-]
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin	[-]
B_F	Biegefaktor	[-]
BHK	Bonferroni-Holm-Korrektur	[-]
BlickG	Gestengesteuerte Blickpositionieraufgabe	[-]
BlickS	Sprachgesteuerte Blickpositionieraufgabe	[-]
B_R	Biegeradius	[mm]
c	Anzahl der durchgeführten statistischen Tests	[-]
CBR	Case-Based Reasoning	[-]
CLT	Cognitive Load Theory	[-]
CPS	Cyber-Physische Systeme	[-]
CPPS	Cyber-Physische Produktionssysteme	[-]
CSCW	Computer-Supported Cooperative Work	[-]
CTT	ConcurTaskTree	[-]
d	Effektstärke nach Cohen	[-]
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung	[-]
D_H	Halbzeugdurchmesser	[mm]
e	Menschliche Eigenschaften	[-]
EA	Elektromyographische Aktivität	[V]
EA_0	Elektromyographische Aktivität in Ruhe	[V]
EA_{max}	Maximalwert der elektromyographischen Aktivität	[V]
EAWS	Ergonomic Assessment Worksheet	[-]
EMG	Elektromyogramm	[V]
ERE	Expert-Reversal Effect	[-]
f	Freiheitsgrad	[-]
f_1	Fähigkeiten des Menschen	[-]
f_2	Fertigkeiten des Menschen	[-]
F	Belastungsfaktoren	[-]

FEM	Finite-Elemente-Methoden	[-]
G	Belastungsgrößen	[-]
GUI	Graphical User Interface	[-]
H	Belastungshöhe	[N]
H ₀	Nullhypothese	[-]
H ₁	Alternativhypothese	[-]
HCI	Human Computer Interaction	[-]
HHT	Heben, Halten, Tragen	[-]
HL	HoloLens	[-]
HL _f	HoloLens-Nutzung im fixierten Fenstermodus	[-]
HL _v	HoloLens-Nutzung im variablen Fenstermodus	[-]
HMD	Head-Mounted Display	[-]
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik	[-]
IoT	Internet of Things	[-]
IIoT	Industrial Internet of Things	[-]
k	Anzahl der Rangbildungen	[-]
KLT	Kleinladungsträger	[-]
KS	Kolmogorov-Smirnov-Test	[-]
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen	[-]
li	Linksseitig	[-]
L	Logistikschritt	[-]
LASI	Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik	[-]
LMM	Leitmerkmalmethoden	[-]
M	Arithmetisches Mittel bzw. Mittelwert	[-]
MD	Median	[-]
Mont	Montagetätigkeit	[-]
MTM	Methods-Time Measurement	[-]
MVC	Maximum Voluntary Contraction	[-]
n	Umfang einer Stichprobe	[-]
NASA-TLX	NASA Task Load Index	[-]
OEMG	Oberflächen-Elektromyographie	[-]
o	Oberer Bereich bzw. obere Stelle	[-]
p	Beobachtetes Signifikanzniveau	[-]
PI	Papier-Instruktion	[-]
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson	[-]
re	Rechtsseitig	[-]

R	Rüstschrift	[-]
RFID	Radio Frequency Identification	[-]
RSME	Rating Scale of Mental Effort	[-]
RVC	Reference Voluntary Contraction	[-]
SD	Standardabweichung	[-]
sEA	Standardisierte elektromyographische Aktivität	[%]
sterno	M. sternocleidomastoideus	[-]
SW	Shapiro-Wilk-Test	[-]
t	Prüfgröße des t-Test	[-]
t _a	Untere Anzahl- bzw. Dauerpunkte der EAWS-Skalierung	[-]
t _b	Obere Anzahl- bzw. Dauerpunkte der EAWS-Skalierung	[-]
t _x	Korrekturwert	[-]
t _i	Länge der i-ten Rangbildung	[-]
trap	M. trapezius pars descendens	[-]
T	Belastungsdauer	[min]
TA-EG	Technikaffinität zum Umgang mit elektronischen Geräten	[-]
TN	Teilnehmer	[-]
T _B	Zeitbasis	[sec]
u	Unterer Bereich bzw. untere Stelle	[-]
UAS	Universelles Analysiersystem	[-]
VA	Versuchsabschnitt	[-]
VFQ	Visual Fatigue Questionnaire	[-]
VP	Versuchsperson	[-]
VR	Virtual Reality	[-]
W	Prüfgröße des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test	[-]
W _F	Wanddickenfaktor	[-]
W _t	Wanddicke	[mm]
x _i , y _i	Messwerte einer Stichprobe	[-]
X	Interpolierter Punktwert der EAWS-Skalierung	[-]
ZS	Ziehen, Schieben	[-]
α	Signifikanzniveau bzw. Irrtumswahrscheinlichkeit	[-]
α'	Fehler 1. Art	[-]
α _B	Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur	[-]
μ	Erwartungswert einer Zufallsvariable	[-]
μ _r	Reibungskoeffizient	[-]
σ ²	Varianz bzw. Streuung einer Zufallsvariable	[-]

0 Zusammenfassung

Industrielle Rüstvorgänge sind durch ihren zentralen und zeitkritischen Charakter innerhalb eines Produktionsprozesses sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praxisbezogener Sicht elementar, da sie für die produzierenden Unternehmen mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden sind. Durch eine marktgetriebene, zunehmende Produktindividualisierung steigt neben der Anzahl durchzuführender Rüstprozesse auch die Komplexität der einzelnen Rüstschritte aufgrund sich ständig ändernder Arbeitspraktiken. Zur Bewahrung qualitativ hochwertiger und liefertreuer Produkte erfolgen Optimierungsbestrebungen dieser Prozesse insbesondere hinsichtlich des Zeitaufwandes und der Ressourcenschonung. Weiterhin gilt es, in diesem Kontext einem Fachkräftemangel frühzeitig entgegenzuwirken und mithilfe von schnellen sowie effektiven Lernprozessen das Wissen der Fachkräfte zu sichern und weiterzugeben. Im Zuge des technologischen Fortschritts werden zunehmend analoge durch digitale Lösungen ersetzt, wobei der Forschungsschwerpunkt überwiegend auf einem Datenaustausch zwischen intelligenten Maschinen entlang der gesamten Wertschöpfungskette ausgerichtet war. Eine nutzerzentrierte, ergonomische und wissensbasierte Unterstützung des Menschen durch digitale Technologien in Form von Cyber-Physischen Systemen (CPS) bzw. Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) erfuhr bisher nur bedingt Beachtung, insbesondere bei klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) aufgrund der vornehmlich manuell ausgeführten Umrüstvorgänge.

Die beschriebene Thematik wurde im Rahmen einer umfassenden ethnographischen Studie aufgenommen, um Praktiken von Maschineneinrichtern bei Rüstvorgängen an Umform- oder Biegemaschinen identifizieren zu können. Dabei wurde verdeutlicht, wie ein methodischer Übergang von qualitativer Forschung zum nutzerzentrierten Design eines wissensbasierten Unterstützungssystems im Sinne des Forschungsparadigmas des „Grounded Design“ geschaffen werden kann. Dazu wurde mittels einer Designfallstudie die Relevanz einer Modellierung des Aufgabenspektrums und eines szenario-basierten Designansatzes hinsichtlich wesentlicher Designimplikationen für ein im Rüstkontext einzusetzendes CPPS herausgestellt. Die Erkenntnisse dieser Studie münden in ein übergreifendes Wissenstransfermodell, das die Ableitung von Gestaltungs- respektive Designimplikationen für praxisnahe CPPS erleichtert und optimiert. Auf Grundlage eines Vergleichs von technischen Möglichkeiten mit den im Modell erfassten praxisrelevanten Anforderungen an den Wissens- und Erfahrungstransfer konnte ein neuer, auf Augmented Reality (AR) und Sensortechnologie beruhender methodischer Ansatz zur Erfassung und Weitergabe von propositionalem und prozessualem Wissen, realisiert werden. Dieser ist in verkörperten oder praktischen Handlungen eingebettet und wurde in Form einer prototypischen, aber erfolversprechenden Software-Anwendung für ein AR-basiertes Head-Mounted Display (HMD) umgesetzt. An dem Praxisbeispiel konnte außerdem aufgezeigt werden, inwieweit eine derartige cyber-physische Rüstapplikation den geltenden interaktions-ergonomischen und kompatibilitätsbezogenen Standards im Kontext industrieller Tätigkeiten und gestengesteuerter, binokularer AR-Systeme entspricht bzw. gerecht wird.

Zur ergonomischen und nutzergerechten Bewertung des Rüstprozesses wurden zur Erweiterung der qualitativen Erkenntnisbasis auch quantitative Bewertungs- und Messmethoden herangezogen. Eine durch die Leitmerkmalmethode und das „Ergonomic Assessment Worksheet“ mehrstufig durchgeführte Gefährdungsbeurteilung des Arbeitsprozesses zeigte, dass sowohl ohne als auch mit Nutzung einer Datenbrille zwar ein vertretbares Risiko angenommen werden kann, aber dennoch Maßnahmen zur Gefährdungsprävention respektive Risikobeherrschung eingeleitet werden sollten. Für eine ganzheitliche, objektive und subjekt-bezogene arbeitswissenschaftliche Analyse zum Umgang mit AR-basierten CPPS im Rahmen von Montage- oder Rüstvorgängen wurden zusätzliche ergonomische Teilstudien zur vergleichenden Untersuchung einer instruktionsgestützten Arbeitsausführung mithilfe der Mixed-Reality-Datenbrille Microsoft® „HoloLens“ und einer papierbasierten Arbeitsanweisung durchgeführt. Für diesen Vergleich wurden ausgewählte beanspruchungsrelevante Einflussgrößen während einfacher Montagetätigkeiten und statischen Blickpositionierungen (Teilstudie 1) sowie im Zuge eines Rüstvorgangs einer Rotationszugbiegemaschine

(Teilstudie 2) evaluiert. Neben der messtechnischen Erfassung muskelphysiologischer und thermografischer Parameter wurden unterschiedliche Fragebogeninstrumentarien herangezogen, die sich aus standardisierten Fragebögen und qualitativen Interviews zusammensetzten und in Ergänzung zum subjektiven, psychologischen Beanspruchungserleben auch Aspekte der Benutzerfreundlichkeit bzw. Usability abdeckten.

Sowohl die objektiven als auch die subjektiven Beanspruchungsdaten überschritten im Zuge der Versuchsdurchführungen ein moderates Maß nicht. Lediglich die im Rahmen der ersten Teilstudie erfassten Messwerte der entgegen der Blickrichtung liegenden m. sternocleidomastoideus lagen mit durchschnittlich ca. 23 % der mittels der Oberflächen-Elektromyographie (OEMG) erfassten standardisierten elektromyographischen Aktivität bei sehr starken seitlichen Kopfbewegungen deutlich oberhalb der 15 %-Grenze des Kapazitätsmaximums der jeweiligen Muskeln. Somit sind Ermüdungserscheinungen bei der Nutzung der HoloLens bei einer länger andauernden Beanspruchung und bei einem hohen Repetitionsgrad zwar möglich, in Bezug auf den Realkontext jedoch unwahrscheinlich. Dynamische Arbeits- bzw. Rüsttätigkeiten bedingen aufgrund der weitgehend natürlichen Bewegungen des Probanden eine ständige Kontraktion und Relaxation der Muskeln, die dadurch weniger beansprucht werden als bei einer rein statischen Muskelbelastung. Ermüdungserscheinungen sind erneut nur bei einer repetitiven Interaktion mit dem Unterstützungssystem ohne Einhaltung von Pausen denkbar. Die Unterschiede der OEMG-Daten mit und ohne Nutzung der HoloLens sind insgesamt überwiegend signifikant minimal und lassen demnach eine Interpretierbarkeit dieser elektromyographischen Daten bei einem gleichzeitig vorherrschenden sehr geringen Beanspruchungsgrad nur bedingt zu. Ein an den Auflagestellen der Datenbrille feststellbarer signifikanter Temperaturanstieg von ca. 1 °C stellt allerdings ein potenzielles Risiko für das thermische Wohlbefinden des Nutzers dar. Während die subjektive Einschätzung der Probanden hinsichtlich der thermischen Belastung mit den objektiven Messergebnissen übereinstimmen, wird die muskelphysiologische Beanspruchung vereinzelt stärker empfunden als tatsächlich objektiv nachgewiesen werden konnte. Der subjektiv empfundene physische Mehraufwand bei Anwendung der HoloLens resultiert aus der vermeintlichen Schlussfolgerung der Probanden, dass mit den Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich, die objektiv nachgewiesen werden konnten, ein höherer muskulärer Aufwand im Schulter-Nacken-Bereich einhergeht. Weiterhin nahmen die asthenopischen Beschwerden ebenfalls nur ein moderates Maß an. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass sich die durch den Arbeitsprozess hervorgerufene individuelle Belastung des Muskel-Skelett-Systems je nach Alter, Geschlecht und Konstitution sowie individueller Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen der Arbeitspersonen unterschiedlich auswirkten. Die durchgeführten Mess- und Bewertungsverfahren dürfen damit nur als Orientierungshilfe verstanden werden.

Die Versuchspersonen erfuhren zu Beginn der Konfrontation mit neuen Arbeitsaufgaben, einem unbekanntem Endgerät und neuartiger Software zweifelsohne eine erhöhte kognitive Beanspruchung. Aufgrund einer einfachen Bedienbarkeit gepaart mit einer intensiven und konzentrierten Anwendung des Unterstützungssystems, setzt ein Lerneffekt sowohl hinsichtlich der jeweiligen Arbeitsaufgabe als auch in Bezug auf den Umgang mit der Datenbrille und der Applikation schnell ein. Eine repetitive Anwendung bzw. Durchführung unterstützt diesen Effekt zusätzlich und führt dazu, dass die kognitive Beanspruchung verringert werden kann. Wie am Beispiel der zweiten Teilstudie verdeutlicht werden konnte, erfolgten die Rüstvorgänge ohne Einsatz der HoloLens zwar schneller, allerdings benötigten die Probanden im Versuchslauf insgesamt weniger Zeit und verringerten die benötigte Rüstdauer mithilfe der HoloLens um ca. 35 %, wohingegen die papierbasierte Anwendung eine Zeitreduktion von „nur“ rund 25 % ergab. Die Fehlerzahl konnte mit der holografischen Unterstützung um knapp 92 % und anhand der Papierinstruktion um rund 75 % gesenkt werden.

Wenn AR-basierte Instruktionen mit sensorischen Werten kombiniert werden, weisen sie aus arbeitsorganisatorischer Sicht zugunsten einer Optimierung und Standardisierung von manuellen Rüstvorgängen zweifelsohne einen prozesssichernden Mehrwert auf. Dieser Sachverhalt kann

wiederum zu einer langfristig verbesserten Rüstleistung führen. Eine sensorische Kontrolle des Rüstvorgangs begünstigt außerdem eine kognitive Entlastung der Maschineneinrichter, indem die Angst vor einer fehlerhaften Ausführung des visualisierten Rüstschritts reduziert wird. Unerfahrene Maschinenbediener profitieren i. d. R. ausnahmslos von den beschriebenen Hilfsmitteln, da sie ohne Unterstützung vornehmlich keine heuristischen Methoden zur Bewältigung einer bestimmten Situation oder Aufgabe anwenden können.

Die Forschungsarbeiten bringen den Stand der Technik bei der Gestaltung digitaler Technologien respektive CPPS zur Unterstützung von Menschen voran, die mit Umrüstprozessen industrieller Produktionsmaschinen betraut sind. Es konnten für den Austausch von Fachwissen insbesondere hinsichtlich der Kontextualität und Kommunikation unter Berücksichtigung kollaborativer Arbeit und sozialer Rahmenbedingungen Fortschritte erzielt werden, die gleichzeitig neue Forschungsrichtungen zu diesem Thema eröffnen. Nichtsdestotrotz besteht, auch aufgrund zwangsläufiger Limitierungen der Studie(n), nach wie vor Raum für weitere Forschungen zu dem vorgestellten Thema – insbesondere hinsichtlich realer und natürlicher Bedingungen, in denen die Arbeitnehmer keinen kontrollierten Umgebungen ausgesetzt sind. Die AR-Technologie ist in Bezug auf CPPS nur ein Ausschnitt eines umfassenderen Konstrukts, das sensorische Technologie integriert und über „reine“ Arbeitsanweisungen hinausgeht, um die Logistik von Fertigungsprozessen und die Qualitätskontrolle der daraus resultierenden Produkte zu berücksichtigen. Produktionsumgebungen beinhalten Anforderungen für komplexe Aufgaben und Werkzeuge sowie einen großen Anteil an mitarbeiterspezifischem Wissen, das in praktischen Handlungen eingebettet bzw. darin verkörpert ist. Diese gilt es, aufbauend auf dem betrachteten spezifischen Anwendungsfall für eine vollumfassende Unterstützung AR- und wissensbasierter CPPS, auch auf weitere Produktionskontexte oder Wissensgebiete unter Berücksichtigung des aktuellen „digitalen“ Stands der Technik zu übertragen und zu untersuchen. Inwieweit die in den Studien untersuchte experimentelle Nutzung derartiger Unterstützungssysteme in der Praxis auch langfristig einen beanspruchungsminimalen Charakter aufweisen, ist fraglich. Konkrete (normative) Handlungsempfehlungen bestehen aufgrund der dynamischen Technik-Entwicklung und der ausbaufähigen Datenbasis wissenschaftlicher Studien nur bedingt. Eine regelmäßig wiederkehrende Anwendung der HoloLens bzw. eines vergleichbaren Gerätes, die sich auf wenige Stunden pro Schicht beschränkt, ist aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse und durch die stetige technologische und ergonomische Weiterentwicklung sowie eine interaktions- und beanspruchungsbezogene Gewöhnung sowohl aus Arbeitgeber- respektive ökonomischer Sicht als auch für Arbeitnehmer respektive Nutzer für den beschriebenen Rüstkontext jedoch grundsätzlich vorstellbar.

Abstract

Due to their central and time-critical character within a production process, industrial set-up processes are elementary from both a scientific and a practical point of view, as they are associated with considerable costs for manufacturing companies. As a result of market-driven increasing product individualization, not only the number of set-up processes to be carried out is rising, but also the complexity of the individual set-up steps due to constantly changing work practices. In order to maintain high-quality products that are delivered on time, efforts are being made to optimize these processes, particularly with regard to the time required and the conservation of resources. In this context, it is important to counteract a shortage of skilled workers at an early stage and to secure and pass on the knowledge of skilled workers with the help of fast and effective learning processes. In the course of technological progress, analog solutions are increasingly being replaced by digital ones. Here, the research focus was predominantly on data exchange between intelligent machines along the entire value chain. User-centered, ergonomic and knowledge-based support of humans by digital technologies in the form of Cyber-Physical Systems (CPS) or Cyber-Physical Production Systems (CPPS) has so far only received limited attention, especially among Small and Medium-sized Enterprises (SME) due to primarily manual set-up processes.

The described topic was taken up in the context of a comprehensive ethnographic study in order to be able to identify practices of machine setters during set-up processes on forming and bending machines. It was made clear how a methodological transition from qualitative research to the user-centered design of a knowledge-based support system can be created in the sense of the research paradigm of "Grounded Design". For this purpose, a design case study the relevance of modeling the task spectrum and a scenario-based design approach with regard to essential design implications for a CPPS to be used in the set-up context was highlighted. The study's findings result in an overarching knowledge transfer model that facilitates and optimizes the derivation of design implications for practical CPPS. Based on a comparison of technical possibilities with practical requirements for knowledge transfer captured in the model, a new methodological approach based on Augmented Reality (AR) and sensor technology for gathering and transferring propositional and procedural knowledge could be realized. This is embedded in embodied or practical actions and was implemented in form of a prototypical but promising software application for an AR-based Head-Mounted Display (HMD). The practical example also demonstrated the extent to which such a cyber-physical set-up application meets the applicable interaction-ergonomic and compatibility-related standards in the context of industrial activities and gesture-controlled, binocular AR systems.

For the ergonomic and user-oriented evaluation of the set-up process, quantitative evaluation and measurement methods were also used to expand the qualitative knowledge base. A multi-stage risk assessment of the work process using the "Leitmerkmalmethode" and the "Ergonomic Assessment Worksheet" showed that although an acceptable risk can be assumed both without and with the use of smart glasses, nevertheless measures for hazard prevention and risk control should be introduced. For a holistic, objective and subject-related occupational science analysis on the handling of AR-based CPPS in the context of assembly or set-up processes, additional ergonomic sub-studies were conducted for the comparative investigation of instruction-supported work execution using mixed reality smart glasses Microsoft® "HoloLens" and paper-based work instructions. For this comparison, selected strain-relevant influencing variables were evaluated during simple assembly tasks and static gaze positioning (sub-study 1) as well as in the course of a rotary draw bending machine's set-up process (sub-study 2). In addition to the measurement of muscle physiological and thermographic parameters, different questionnaire instruments were used, consisting of standardized questionnaires and qualitative interviews, which also covered aspects of usability and subjective, psychological strain experience.

Both the objective and subjective strain data did not exceed a moderate level in the course of the experimental procedures. Only the measured values of the m. sternocleidomastoideus located

opposite to the direction of gaze recorded in the first sub-study were clearly above the 15 % limit of the respective muscles' maximum capacity with an average of approx. 23 % of the standardized electromyographic activity recorded by means of Surface Electromyography (EMG) during very strong lateral head movements. Thus, although fatigue is possible when using the HoloLens for a longer period of time and with a high degree of repetition, it is unlikely in relation to the real context. Due to the largely natural movements of the test person, dynamic work and set-up activities require constant contraction and relaxation of the muscles, which are therefore less stressed than with a purely static muscle load. Fatigue is again only conceivable during repetitive interaction with the support system without observing breaks. The differences between the Surface EMG data with and without the use of the HoloLens are predominantly significantly minimal. Therefore, the comparison only allows a limited interpretation of these electromyographic data with a simultaneously prevailing very low degree of strain. However, a significant temperature increase of approximately 1 °C at the glasses' contact points represents a potential risk for the user's thermal well-being. While the subjective assessment of the test persons with regard to thermal stress corresponds to the objective measurement results, the muscle physiological strain is sporadically felt to be stronger than actually objectively proven. Furthermore, the asthenopic complaints also only assumed a moderate level. In this context, it should be noted that the individual strain on the musculoskeletal system caused by the work process has different effects depending on the age, sex and constitution as well as individual work techniques and performance requirements of the work persons. Thus, the measurement and evaluation procedures carried out may only be understood as an orientation guide.

At the beginning of the confrontation with new work tasks, an unfamiliar end device and new software, the test subjects undoubtedly experienced an increased cognitive load. Due to simple operability paired with a support system's intensive and concentrated use, a learning effect quickly sets in both with regard to the respective work task and with regard to the data glasses' as well as the application's handling. A repetitive use or execution supports this effect additionally and leads to the fact that the cognitive load can be reduced. As the example of the second sub-study shows: Although the set-up processes were faster without the use of HoloLens, the subjects required less time over the entire experimental run. They reduced the set-up time by about 35 % with the help of HoloLens, whereas the paper-based application resulted in a time reduction of "only" about 25 %. The number of errors was reduced by almost 92 % with the holographic support and by around 75 % with the paper-based instruction.

When AR-based instructions are combined with sensory values, they undoubtedly have a process-saving added value from a work organization perspective: they promote optimization and standardization of manual set-up processes. This in turn can lead to improved set-up performance in the long term. Sensory control of the set-up process also favors cognitive relief for the machine setters by reducing the fear of the visualized set-up step's incorrect execution. Inexperienced machine operators generally benefit without exception from the aids described, since without support they are primarily unable to use heuristic methods to cope with a particular situation or task.

The research advances the state of the art in the design of digital technologies or CPPS to support people involved in set-up processes of industrial production machines. Advances have been made for the exchange of knowledge, especially in terms of contextuality and communication, taking into account collaborative work and social frameworks, while opening up new research directions on this topic. Nevertheless, also due to inevitable studies' limitations, there is still room for further research – especially regarding real and natural conditions where workers are not exposed to controlled environments. With respect to CPPS, AR technology is only a slice of a broader construct that integrates sensory technology and goes beyond "pure" work instructions to address the logistics of manufacturing processes and quality control of the resulting products. Production environments contain requirements for complex tasks and tools as well as a large amount of employee-specific knowledge embedded or embodied in practical actions, which, building on the specific use case considered for a fully comprehensive support of AR- and knowledge-based

CPPS, should also be transferred to and investigated in other production contexts or knowledge domains, taking into account the current "digital" state of the art. The extent to which the experimental use of such support systems will also have a strain-minimizing character in practice in the long term is questionable. Concrete (normative) recommendations for action only exist to a limited extent due to the dynamic development of technology and the expandable database of scientific studies. However, a regular recurring use of the HoloLens or a comparable device, limited to a few hours per shift, is conceivable in principle for the described set-up context, based on the findings and the constant technological and ergonomic further development, as well as interaction and strain-related familiarization, both from the employer's or economic point of view and from the employee's or user's point of view.

1 Einleitung und Problemstellung

Die aus der Globalisierung resultierenden Absatzmärkte stellen zusammen mit den Möglichkeiten der kostengünstigen Produktion ein großes Potenzial für Industrieunternehmen dar. Da globale Märkte auch globalen Wettbewerb implizieren, resultiert daraus eine Flexibilitätserfordernis, die sowohl für klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) als auch für Großunternehmen gilt und direkte Auswirkungen auf industrielle Produktionsvorgänge hat (vgl. LUDWIG et al., 2016). Industrieunternehmen müssen ihre Produkte den Marktgegebenheiten und den kurzen Produktlebenszyklen anpassen. Einerseits besteht die Notwendigkeit, den Ressourceneinsatz zu reduzieren, andererseits werden immer vielfältigere Qualitätsanforderungen gestellt (vgl. SHINGO, 1985). Eine Erweiterung der Marktposition durch neue, fortschrittliche und qualitativ hochwertige Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen ist unabdingbar. Folglich herrscht ein Spannungsfeld zwischen Kostendruck, Qualitätsansprüchen und kundenspezifischen Produktmerkmalen. Bestehende Geschäftsmodelle werden laufend in Frage gestellt, Marktanteile verschieben sich. Neben dem rasanten technischen Fortschritt hat auch und nicht zuletzt die COVID-19-Pandemie gezeigt, dass die Industrie aufgrund sinkender Nachfragen oder unterbrochener Lieferketten einen kontinuierlichen Veränderungs- und Anpassungsprozess durchläuft. Dieser Flexibilitätsbedarf bezieht sich insbesondere auch auf die Mitarbeiterebene, indem flexible Kompetenzen zur Bewältigung heterogener Fertigungsprozesse gefordert werden. Die daraus resultierende Komplexität geht mit einer wissensintensiven Umgebung einher (vgl. ACKERMAN et al. 2013; ARGOTE et al. 2000).

Im industriellen Umfeld nimmt demnach infolge des steigenden Bedarfs kundenindividueller Produktanforderungen die Anzahl der Produktvariationen zu. Ein früher Versuch, diesen Herausforderungen zu begegnen, war das prozessorientierte Konzept des „Lean Management“ bzw. der „Lean Production“. Es zielt darauf ab, den Anforderungen an eine Flexibilität, mit der Unternehmen auf globale Marktveränderungen reagieren müssen, gerecht zu werden. Die Produktionsplanung ist primär nicht auf die Optimierung der Maschinenkapazitäten, sondern vielmehr auf die Erfüllung der Kundenwünsche ausgerichtet (vgl. WOMACK et al., 1990). Neuartige Forschungsansätze und -methoden bieten in Kombination mit technischen und digitalen Hilfsmitteln neue Möglichkeiten für die physikalische Prozessgestaltung (vgl. BIRKHAN, 2008). Die dadurch entstehenden Veränderungen sind so weitreichend, dass sie einen Paradigmenwechsel kennzeichnen. Dieser Sachverhalt ist insbesondere bei europäischen und nordamerikanischen Industrieunternehmen zu beobachten. In der jüngeren Zeit wurde das Konzept der Lean Production durch ein sozio-technisches System erweitert, welches das gesamte Unternehmen, die Kunden, die Zulieferer, die Instandhaltung, die Fertigungssteuerung sowie eine ergonomische Arbeitsplatzauslegung inklusive

einer nutzerzentrierten Feedbackaufbereitung umfasst (vgl. SHAH & WARD, 2007). Folgen Unternehmen dem Konzept der „schlanken Fertigung“, sind sie aufgrund des erhöhten Bedarfs an kundenspezifischen Produkten gezwungen, niedrigere Stückzahlen bzw. Losgrößen zu fertigen. Im Vergleich zur Massenproduktion entstehen dadurch höhere Stückpreise. Dieser Umstand führt wiederum zu einem Anstieg der insbesondere bei KMUs aufgrund des geringen Standardisierungs- und Automatisierungsgrades häufig noch manuell ausgeführten Rüstvorgänge an Maschinen (LUDWIG et al., 2016). Industrielle Rüstvorgänge beeinflussen den Produktionsfluss dadurch, dass sie in den meisten Fällen vor dem eigentlichen Fertigungsprozess durchgeführt werden müssen, unmittelbar. Die Anzahl der zentralen und zeitkritischen Rüstvorgänge ist demzufolge ein Indikator für die Verschlechterung des Verhältnisses von Produktionszeit zu Rüstzeit. Weiterhin entwickelt der Mitarbeiter in Abhängigkeit der unterschiedlichen Ausprägungen kundenspezifischer Produkte weniger Routine im Zuge der Einrichtvorgänge. Die Komplexität der einzelnen Rüstschritte steigt also in diesem Zusammenhang und beeinflusst sowohl den zeitlichen Aufwand als auch die Qualität des Rüstprozesses (vgl. JANSSEN & MÖLLER, 2011). Seine Optimierung ist der Schlüssel zur Maximierung einer effizienten Fertigung und zum bestmöglichen Handling kleiner Auftrags- und Liefergrößen.

Darüber hinaus ist durch den demografischen Wandel der Gesellschaft mit einer Verlängerung der Lebensarbeitszeit der Erwerbstätigen zu rechnen. Eine ergonomische Auslegung des Arbeitsplatzes sowie der genutzten Arbeitsmittel ist somit unabdingbar (MÜHLENBROCK, 2017). Ein weiterer, in diesem Zusammenhang elementarer Aspekt, ist das mit dem Ausscheiden erfahrener Arbeitspersonen verlorengewandene Erfahrungswissen. Um einem Fachkräftemangel entgegenwirken und gleichzeitig die Prozesssicherheit und -qualität für sämtliche Arbeitsdisziplinen nachhaltig gewährleisten zu können, sollte das fachspezifische Wissen auf zukünftige bzw. jüngere Generationen übertragen und sichergestellt werden (vgl. u. a. ORIANI & REISACH, 2017).

Mehrere Forschungsbereiche beschreiben die Schwierigkeit, Wissen und Fähigkeiten aus der realen Welt zu erfassen, zu beschreiben und letztlich zu demonstrieren, sodass auf dieses Wissen zurückgegriffen werden kann (vgl. SCHMIDT, 2012; NONAKA & TAKEUCHI, 1995). Die Unterscheidung von „Knowing how“ und „Knowing that“ liegt in ihrer Propositionalität (vgl. RYLE 2009; RYLE 1945). Während sich Letzteres verbalisieren lässt, erfordert Ersteres hingegen kein theoretisches Verständnis (vgl. ACKERMANN et al., 2013; SCHMIDT, 2012). POLANYI (1967) erweiterte diese Diskussion um die Begrifflichkeiten „implizites“ oder „stillschweigendes“ Wissen. Die vorliegende Ausarbeitung soll mitunter zeigen, dass tacites Wissen nicht zwangsläufig stillschweigend ist, sondern vielmehr in Gesprächen artikuliert wird oder sich in Gesten, Blicken oder Aktionen manifestiert. Dies geschieht jedoch unter höchst kontingenten und lokalen Umständen (vgl.

u. a. RANDALL et al., 1996). Qualitative Ansätze verhelfen in diesem Zusammenhang zur „Sichtbarmachung“ von „Know how“ und „unsichtbaren“ Arbeitspraktiken (vgl. CLARKE et al., 2003). Durch zeitliche Kapazitäten, datenschutzrechtliche Bedingungen und der Bewahrung etwaiger Alleinstellungsmerkmale ist es auch unter Berücksichtigung didaktischer Herausforderungen jedoch keineswegs trivial, das in Praktiken eingebettete, nicht-propositionale Wissen (selbst) zu erfassen.

Um den beschriebenen Herausforderungen hinsichtlich der Minimierung von Rüstzeiten, der Gewährleistung ergonomischer Gestaltungsaspekte sowie der Erfassung und Bereitstellung von (Fach-)Wissen begegnen und somit Maschineneinrichtern eine umfangreiche Unterstützung gewährleisten zu können, müssen praktische, effiziente und nutzerzentrierte Methoden und Werkzeuge herangezogen werden. Die fortschreitende Digitalisierung nimmt dabei eine maßgebende Rolle ein. Digitale Technologien treiben in Form von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in sämtlichen Branchen Veränderungen und Innovationen an und durchdringen zunehmend den Alltag westlicher Gesellschaften (vgl. N.N., 2020; BÜSCHER et al., 2014). Eine kundenorientierte sowie auf digitale Wertschöpfung ausgerichtete Unternehmensphilosophie zielt auf smarte digitale, datenbasierte Produkte bzw. Dienstleistungen ab. Eine Lösung, die an diese Zielsetzung anknüpft, ist das „Internet of Things“ (IoT). Das IoT vernetzt physische Objekte mit einer virtuellen Umgebung, die durch das Zusammenspiel von Sensorik und Internet respektive Cloud-Plattform miteinander verbunden sind, z. B. durch Ansätze zugunsten eines allgegenwärtigen und echtzeitnahen Datenzugriffs wie „Big Data“, „Cognitive Computing“, „Pervasive Computing“ und „Ubiquitous Computing“, (vgl. MANYIKA ET AL., 2015; NORMAN, 1998). „Industrie 4.0“ ist eine Bewegung, die aus der Forderung der deutschen Bundesregierung nach einer „vierten industriellen Revolution“ entstanden ist – inspiriert durch den Einsatz von neuen sogenannten Cyber-Physischen Systemen (CPS), die in Fertigungskontexten auch als Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) bekannt sind (vgl. PAELKE & RÖCKER, 2015). Das „Industrial Internet of Things“ (IIoT) wird, speziell im englischsprachigen Bereich, oft als Synonym für Industrie 4.0 verwendet. Beide Begriffe stehen im beschriebenen Kontext für die Implementierung des IoT in die industrielle Produktionsumgebung. Zusammen mit dem Aufkommen von neuartigen CPPS können Analysen, Wissensextraktionen und -archivierungen sowie Diagnosen ökonomischer Prozesse auf Grundlage großer und vernetzter Datenmengen durchgeführt und damit die Verflechtung wirtschaftlicher Infrastrukturen noch stärker vorangetrieben werden (vgl. HIETANEN et al., 2020; STERN & BECKER, 2020; SUN et al. 2020; ZIDEK et al., 2020). Eine zunehmend vernetzte Arbeitswelt zeigt sich bspw. dadurch, dass Arbeitsstellen auf sozialen Medien, wie LinkedIn oder Facebook, ausgeschrieben und Produktionsplanungen von modernen Planungs- und Dispositionssystemen übernommen werden. Fertigungsmaschinen sammeln automatisch Daten über den Produktionsprozess. Enterprise-Resource-Planning-Systeme bestellen Materialien automatisch, bewerten und wählen Lieferanten

und priorisieren Kunden, um eine stabile Produktionsumgebung zu generieren (vgl. STEIN et al., 2018).

Neue Technologien, wie auf Augmented Reality (AR) basierende CPPS in Kombination mit vielfältigen Möglichkeiten des IoT, können dazu verhelfen, die beschriebene Problematik zu adressieren. AR ist als neue Visualisierungsart, die ortsbezogene Informationen schnell und einfach übertragen kann, potenziell dazu geeignet, Wissen und Expertise zu erfassen und zu teilen (vgl. ACKERMANN et al., 2013). Die Forschung zur praktischen Anwendung von AR-basierten CPPS, z. B. in Form von Datenbrillen oder Head-Mounted Displays (HMD), gilt jedoch bisher als unterrepräsentiert. Gleichzeitig zeigt sie deren Potenzial auf (vgl. REJEB et al., 2021; BHATTACHARYA & WINER, 2019). Aufgrund des relativ frühen Entwicklungsstadiums weisen einige von ihnen z. T. (interaktions-)ergonomische Limitierungen sowohl hinsichtlich der konstruktiven als auch im Hinblick auf die hardware- und softwareseitige Applikations-Gestaltung auf, die zwangsläufig die Nutzerakzeptanz beeinflussen (vgl. PAELKE & RÖCKER, 2015; MONOSTORI, 2014). Eine Vielzahl von Studien wurde bspw. hinsichtlich des Einsatzes von AR-Technologie bei Lernprozessen im Zuge einer Montageunterstützung in einer industriellen Arbeitsumgebung durchgeführt (vgl. LEWIS & NEIDER, 2016). Dabei stellte sich heraus, dass ein geringerer Interaktionsaufwand mit einer verbesserten Leistung und einer Abnahme der kognitiven Belastung einhergeht. Der Umgang mit AR-Tools, insbesondere mit AR-basierten HMD, kann jedoch auch zu erhöhten psychischen bzw. kognitiven Beanspruchungen (vgl. u. a. DROUOT et al., 2022; JEFFRI & RAMBLI, 2021; TEGTMEIER & WISCHNIEWSKI, 2018; WILLE, 2016) sowie vermehrten physischen Beanspruchungen im Schulter-Nacken-Bereich des Nutzers (vgl. u. a. LIM et al., 2022; FRIEMERT et al., 2020; COMETTI et al., 2018; THEIS et al., 2016) führen. In diesem Zusammenhang besteht insbesondere im Hinblick auf industrielle Tätigkeiten und binokulare sowie gestengesteuerte AR-Systeme weiterhin Bedarf für ergonomische Untersuchungen auf Basis sowohl quantitativer als auch qualitativer Daten. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, wesentliche praxisorientierte, wissensbasierte und (interaktions-)ergonomische Designimplikationen für derartige CPPS zu definieren.

Sämtliche Komponenten müssen in sozio-technischen Systemen der Arbeitswelt aufeinander ausgerichtet werden. Innerhalb eines Mensch-Maschine-Systems sind sensorische und motorische Schnittstellen zur Gewährleistung höchster Sicherheit und optimaler Leistung unter Berücksichtigung menschlicher Eigengesetzlichkeiten hinsichtlich der Informationsaufnahme und -abgabe auszulegen. In einer übergeordneten Ebene bezieht sich dieser Sachverhalt auf eine sinnvolle Zuordnung von Informationen, die auf Anzeigen und Displays analog oder insbesondere im Zuge des fortschreitenden Stands der Technik digital dargestellt werden, zu (meist) motorischen Reaktionen, die an einem Stellteil bzw. an einem Gerät erforderlich werden. Ein hoher Grad an Reiz-

Reaktions-Kompatibilität ist dann gegeben, wenn Ursache und Wirkung möglichst einfach miteinander verknüpft sind, d. h. klar erkennbare und eindeutige Reiz-Reaktions-Beziehungen vorliegen.

Trotz des in diesem Zusammenhang in der Literatur identifizierten Potenzials moderner Technologien (vgl. u. a. ZIDEK et al., 2020) wurden nur wenige Erkenntnisse hinsichtlich der Bedürfnisse und Anforderungen der Nutzer publiziert. Die Arbeiten des Forschungsprojekts „Cyberrüsten 4.0“ setzten daran an, um ein prototypisches AR- und sensorbasiertes Unterstützungssystem für den Wissens- und Erfahrungsaustausch im Rahmen industrieller Rüst- bzw. Einrichtprozesse von Umform- respektive Biegemaschinen zu konzipieren. In Kombination mit prozessrelevanten und kodifizierten Informationen über eine Maschine sowie über Werkzeug- und Materialeigenschaften und geeigneten sensorischen Eingangswerten sowie Simulationen verhilft die Unterstützungssystematik dazu, die Rüstvorgänge effizienter zu gestalten und letztlich einen ökonomischen Vorteil in Form einer Rüstzeitminimierung anzustreben. Dazu erfolgte im Zuge einer ethnographischen Studie eine Analyse der Praktiken von Rüstvorgängen an Umform- bzw. Biegemaschinen. Dabei sollte eruiert werden, wie AR- und sensorbasierte CPPS wichtige methodische Veränderungen in der Erfassung und Aufbereitung von Wissen bewirken können. Weiterhin wurde ein Wissenstransfermodell entwickelt, das sowohl die Abstraktion übergeordneter Forschungselemente als auch die potenziell damit verbundenen Designaktivitäten umfasst. Vor diesem Hintergrund wurden u. a. mehrere experimentelle Studien mit dem Forschungsziel durchgeführt, mögliche Einflussfaktoren auf die physische und psychische Arbeitsbeanspruchung sowie die Performance eines Maschineneinrichters durch die Nutzung eines derartigen Hilfsmittels abzuleiten und zu evaluieren. Im Rahmen einer umfassenden arbeitswissenschaftlichen Forschung erfolgten arbeitsphysiologische Untersuchungen sowie subjektive Befragungen zu unterschiedlichen Aspekten, d. h. Trageeigenschaften und daraus resultierende körperliche Beanspruchungen, Umgang mit dem System und der Arbeitsaufgabe etc., im Umgang mit einem AR-basierten Unterstützungssystem und in Anlehnung an industrielle Rüstvorgänge. Langfristig sollen die Erkenntnisse auf einen präventiven Gesundheitsschutz respektive einen Erhalt der Arbeitsfähigkeit abzielen, die eine gefährdungsfreie Aufgabenerfüllung sicherstellt und damit insgesamt das Leistungsniveau nachhaltig verbessert.

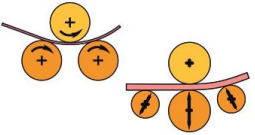
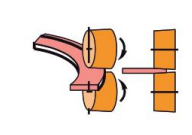
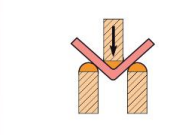
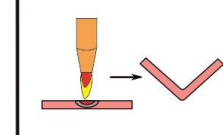
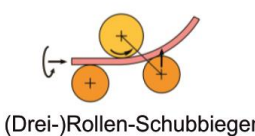


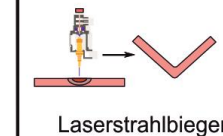

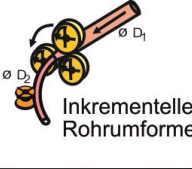

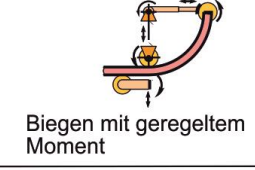



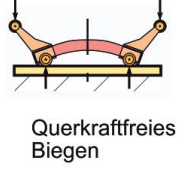

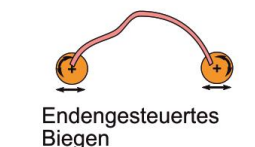
2 Industrielle Rüstprozesse am Beispiel des Rotationszugbiegens

Nach DIN 8580 (2003) zählt das Umformen zu einer der insgesamt sechs Gruppen industrieller Fertigungsverfahren. Der Umformprozess erfolgt durch das plastische Verformen eines festen Körpers gemäß der Volumenkonstanz, d. h. unter Beibehaltung seiner Stoffzusammensetzung sowie seiner Masse. Die Biegeumformung wird neben der Druck-, Zugdruck-, Zug- und Schubumformung in der DIN 8582 (2003) aufgeführt. Die DIN 8586 (2003) definiert die Biegeumformung als „Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch Biegebeanspruchung herbeigeführt wird.“ Das Biegeumformen wird in das Biegen mit translatorischer sowie rotatorischer Werkzeugbewegung und der Art des Halbzeugs in Blech- und Profilbiegen unterteilt.

Die Biegeumformung ist ein hochfrequent angewendetes Biegeverfahren, das sowohl in der Massen- als auch in der Einzelfertigung in unterschiedlichen Branchen, z. B. im Maschinen- und Anlagenbau, in der Automobil- oder in der Luft- und Raumfahrtindustrie, Anwendung findet. Zu umformbaren Bauteilen zählen Bleche, Drähte, Rohre und Profile mit unterschiedlichen Querschnittsformen. Zur Gewährleistung konstruktiv eingeschränkter Einbausituationen werden nach BURKHARDT (2008) Bauteile mit kleinen Biegeverhältnissen verwendet. Somit erfolgen die Umformprozesse beim Kaltumformen im werkstoffspezifischen Grenzbereich des Umformvermögens. Demzufolge kommen den Versagensmerkmalen am Bauteil sowie den Qualitätsindikatoren des jeweiligen Biegeprozesses eine wesentliche Bedeutung zu.

In Abbildung 2.1 sind die kinematischen und formspeichernden Biegeverfahren aufgeführt. Erstere werden um thermisch induzierte Verfahren bzw. um die Gruppe derjenigen Biegebauteile ergänzt, die durch Wirkmedien gebogen werden.

Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen des Rotationszugbiegens aufgeführt. Dieser Prozess stellt einen praktischen Anwendungsprozess dar, auf den sich die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Cyberrüsten 4.0“ erhobenen empirischen Daten beziehen. Nach VDI 3430 (2014) und ENGEL & MATHES (2013) ist das Rotationszugbiegen ein formgebendes Kaltumformverfahren, das drehende Werkzeugbewegungen ausführt. Formspeichernde Werkzeuge vollziehen die Formgebung des Halbzeugs, das sowohl als Voll- als auch als Hohlprofil gebogen werden kann. Aufgrund eines umfassenden Werkzeugaufbaus (siehe Abb. 2.2) und den dadurch erforderlichen Einstellmaßnahmen unterschiedlicher Maschinenachsen resultiert ein komplexer Rüst- und Einrichtprozess.

	drehende Werkzeugbewegung	geradlinige Werkzeugbewegung	thermisch induzierte Verfahren	
Kinematische Definition der Biegekontur	 (Drei-)Rollen-Biegen	 Schweißen, partielles Auswalzen	 3-Punkt-Biegen	 Thermisch induziertes Flamm-Biegen
	 (Drei-)Rollen-Schubbiegen	 Biegen mit überlagertem Längswalzen	 Freiformbiegen mit beweglicher Matrize	 Laserstrahlbiegen
	 Mehrrollenbiegen mit Torsionsüberlagerung	 Inkrementelles Rohrumformen	 Biegen in Kombination mit Durchdrücken	
	 Biegen mit geregelterm Moment	 Biegen mit Induktiver Erwärmung	 Biegen mit Aufweiten	
	 Walzprofilieren mit überlagerter Biegung	 Querkraftfreies Biegen	 Profilbiegen in einer elastischen Matrize	
	 Endengesteuertes Biegen			

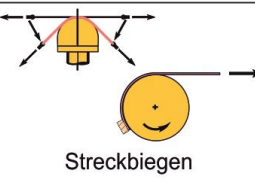
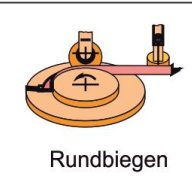
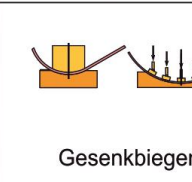


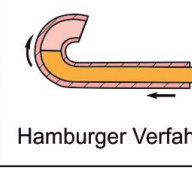
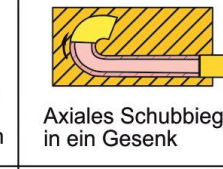
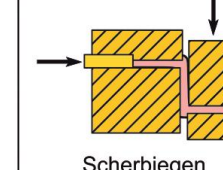
	drehende Werkzeugbewegung	geradlinige Werkzeugbewegung		
Formgebundene Kontur	 Streckbiegen	 Rundbiegen	 Gesenkbiegen	
	 Rotationszugbiegen	 Klassisches Rohrbiegen	 Hamburger Verfahren	 Axiales Schubbiegen in ein Gesenk
				 Scherbiegen

Abb. 2.1: Übersicht der kinematischen und formspeichernden Biegeverfahren (VDI 3430, 2014)

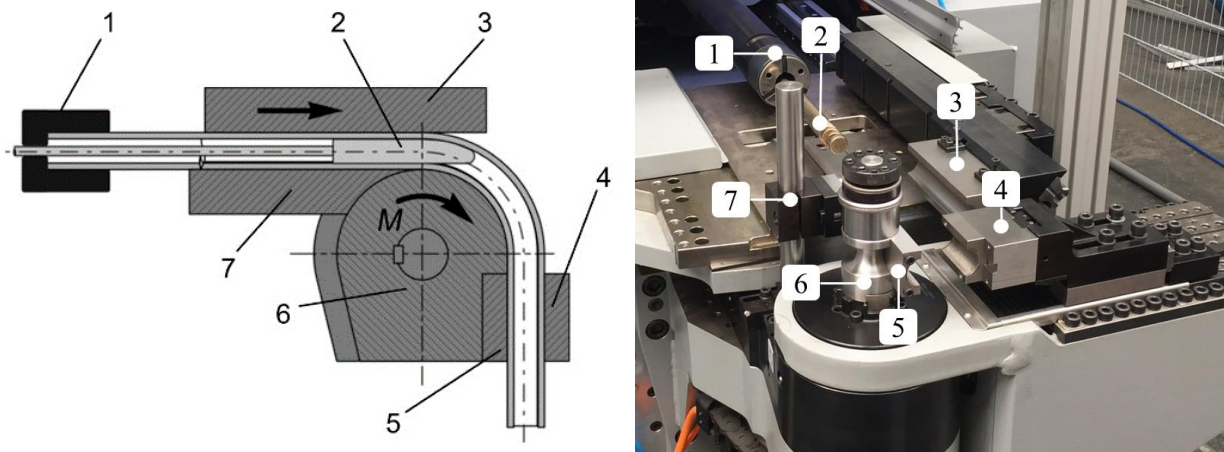


Abb. 2.2: *Werkzeuganordnung des Rotationszugbiegeprozesses: Spannfutter bzw. Vorschubeinheit (1), Biegedorn (2), Gegenhalter (3), äußere Spannbacke (4), innere Spannbacke (5), Biegeform (6) und Faltenglätter (7) (links: VDI 3430, 2014; rechts: Rotationszugbiegemaschine „RBV35“ der Firma Wafios)*

Rüstvorgänge umfassen vor dem Start eines Produktionszyklus eine Reihe von vorbereitenden Maßnahmen an (Fertigungs-)Maschinen oder Werkzeugen. Sie finden zwischen dem Ende der Serienproduktion eines Artikels und dem Beginn der Serienproduktion eines anderen Artikels statt. Neben der logistischen Bereitstellung von Werkzeugen, Montagehilfsmitteln und Halbzeugen wird die Maschine bzw. werden die einzelnen Werkzeuge artikelspezifisch umgerüstet. Im Anschluss an das mechanische Umrüsten erfolgt der Herstellungsprozess des Bauteils. Das Halbzeug wird dabei im Spannfutter sowie zwischen der inneren und äußeren Spannbacke geklemmt und in der Kavität der Biegeform um den Biegemittelpunkt gebogen. Die Vorschubeinheit wird i. d. R. zur Positionierung des Halbzeugs genutzt und bewegt das Werkstück in Umformrichtung. Der Biegedorn, der das Profil an der Innenseite unterstützt respektive den Profilhohlraum konstruktiv ausfüllt, zielt auf eine Minimierung von Querschnittsdeformationen und Faltenbildungen am Innenbogen des Halbzeugs ab (vgl. OEHLER, 1971). Der Gegenhalter stabilisiert das gerade Profilstück vor der Umformzone. Ein in der Kavität der Biegeform anliegender Faltenglätter schließt den Spalt zwischen dem geraden Halbzeugabschnitt und der Biegeform ab. Der Faltenglätter nimmt die wirkenden Kräfte über den Biegedorn und das Werkstück auf.

Die Ausprägung und Anzahl der benötigten Werkzeuge hängt von den zu berechnenden geometrischen Bezugsgrößen bzw. der Formkomplexität des Biegebauteils ab. Der Biegevorgang von kreisrunden Rohren mit der Profilhöhe generiert ein Bauteil mit einem definierten Biegeradius B_R und dem Biegewinkel. Der Rohraußendurchmesser ist mit der Profilhöhe gleichzusetzen. Die grundlegenden Faktoren zur geometrischen Beschreibung des Biegebauteils sind der Biegefaktor

B_F (Formel 2.1) und der Wanddickenfaktor W_F (Formel 2.2). Während der Wanddickenfaktor W_F das Verhältnis von Halbzeugdurchmesser D_H zur Wanddicke W_t beschreibt, ist der Biegefaktor B_F der Quotient von Biegeradius R zum Halbzeugdurchmesser D_H .

$$B_F = \frac{B_R}{D_H} \quad (2.1)$$

$$W_F = \frac{D_H}{W_t} \quad (2.2)$$

Basierend auf den geometrischen Faktoren – in diesem Kontext sind der Biegefaktor B_F und der Wanddickenfaktor W_F von Relevanz – nimmt die Anzahl der benötigten formgebenden Werkzeuge mit Zunahme der Formkomplexität zu (siehe Abb. 2.3; vgl. ENGEL et al., 2014).

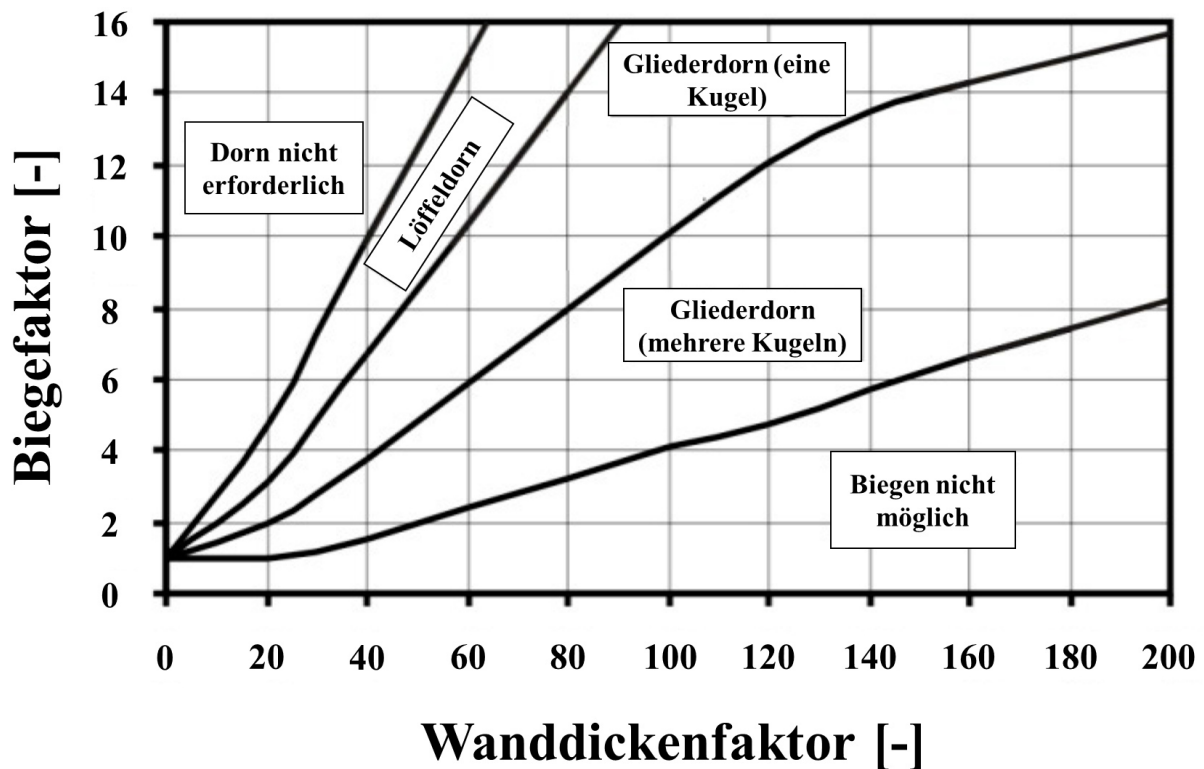


Abb. 2.3: Biegediagramm für die Auswahl des Dorns (modifiziert nach VDI 3430, 2014)

Der Fertigungsprozess durchläuft in Abhängigkeit des Bauteilzustandes bzw. der Fehlerbilder des Erzeugnisses bis zum ersten Gutteil i. d. R. mehrere Iterationsschleifen. Diese umfassen insbesondere werkzeug- und maschinenachsenspezifische Änderungen, die entweder durch Nachjustierungen der Werkzeuge oder durch Anpassungen der CNC-Achsen im Maschinenprogramm vorgenommen werden. Der Maschineneinrichter entscheidet anhand der Konfigurationsparameter in der Steuerung der Maschinen, welches Werkzeug an welcher Position mit welcher Kraft respektive

Geschwindigkeit bewegt werden muss. Dabei können durchaus mehrere Einstellungen zielführend sein und letztlich ein zeichnungsgerechtes und fehlerfreies Produkt liefern.

Der Rüstvorgang kann in Abhängigkeit der Komplexität des Rüstvorgangs und der Maschinengröße von einem einzelnen Maschineneinrichter oder von zwei oder mehr Maschineneinrichtern durchgeführt werden. Nach dem heutigen Stand der Technik basieren die Arbeitsvorgänge bzw. Einstellungsmaßnahmen auf dem Expertenwissen des Mitarbeiters und werden vorwiegend nach dem „Trial-and-Error“-Prinzip durchgeführt (vgl. HELLER et al., 2015; KORTE 2013). Dieser Umstand sowie die v. a. bei KMU zu beobachtende geringe Standardisierung des Biegeprozesses führen dazu, dass die an dem Rüstprozess beteiligten Mitarbeiter ein ausgeprägtes, spezifisches Wissen aufweisen. Es lässt sich an dieser Stelle konstatieren, dass sowohl die Zeit bis zur Herstellung eines zeichnungsgerechten Biegeteils als auch die Qualität des Biegeteils von den Maschineneinrichtern abhängig sind. Innerhalb der industriellen Fertigung ist der Rüstprozess also ein Schlüsselprozess, der rechtzeitig durchgeführt werden muss, da ohne dessen Fertigstellung keine Produktion erfolgen kann (vgl. KOBER et al., 2014). Rüstvorgänge an komplexen Produktionsmaschinen, wie z. B. an einer Rotationszugbiegemaschine, stellen einen wissensintensiven Prozess dar, der sich hauptsächlich auf Erfahrungs- und Fachwissen stützt. Derartiges Wissen kann sehr individuell sein und ist sehr schwer zu erfassen und zu teilen (vgl. MATTHEW & STERNBERG, 2009; NONAKA et al., 2000).

Neben den beschriebenen Herausforderungen kann es darüber hinaus zu weiteren komplexen Entscheidungssituationen während eines Rüstprozesses kommen, bei denen die Erfahrungen und Handlungsalternativen des Mitarbeiters von wesentlicher Bedeutung sind. So müssen vor der artikelspezifischen Montage der Werkzeuge bspw. bauteilspezifische Charakteristiken, im Wesentlichen die Maschinen- und Werkzeugparameter und das Materialverhalten, gemessen und vor dem Hintergrund des technischen Einsatzgebietes des Produktes zusammengefasst werden (vgl. KUHNHEN et al., 2016). Für den Mitarbeiter impliziert dieser Umstand eine komplexe Produktionsumgebung, da nicht alle Parameter im Voraus erfasst werden können. Einige Parameter unterliegen gar einer dynamischen Änderung (vgl. BYSTRÖM & JÄRVELIN, 1995). Der Umgang mit einer solchen Aufgabe führt zwangsläufig zu einer Betrachtung unterschiedlicher individueller Ausprägungen, da hier verschiedene Stufen wahrgenommener Komplexität vorliegen (vgl. CAMPBELL, 1988) und differente Informationsebenen ohne Überforderung bzw. Überbeanspruchung verarbeitet werden müssen (vgl. EPPLER & MENGIS, 2004; WILSON, 2001).

Der zunehmende Bedarf an individuellen Produktanforderungen führt zu einer steigenden Anzahl an Produktvariationen und dem damit einhergehenden unternehmerischen Zwang, kleine Los-

größen bzw. niedrige Stückzahlen zu produzieren (vgl. ÇAKMAKCI, 2009). Dadurch steigt, insbesondere für KMU, der Anteil manueller Rüstvorgänge. Um Maschinenstillstandszeiten so kurz wie möglich zu halten, werden arbeitsorganisatorische Optimierungsmaßnahmen herangezogen. Das Lean Management verfolgt mit dem Ansatz des „Single Minute Exchange of Die“ (SMED) das Ziel, die zeitliche Dauer des Umrüstens einer Maschine in mehreren iterativen Schritten auf möglichst bis zur Hälfte der ursprünglich benötigten Zeit zu minimieren (vgl. SHINGO, 1985). Das prozessspezifische Modell sieht eine Teilung des Rüstvorgangs in interne und externe Arbeitsanteile vor. Während Rüstprozesse bei Ersteren nur bei stillstehender Maschine durchgeführt werden können, sind Rüsttätigkeiten bei Letzteren auch während einer laufenden Maschine respektive Produktion möglich (vgl. GERBERICH, 2011). Während Opportunitätskosten aus großen Losen und somit aus hoher Kapitalbindung einen damit einhergehenden Lagerungsaufwand verursachen, spiegeln direkte Kosten einen Produktionsstillstand und den Personalaufwand im Zuge des internen Rüstens wider. Daher liegt das Hauptaugenmerk auf der Optimierung und v. a. auf der Reduzierung der internen Rüstvorgänge (vgl. GRIEMERT, 2017). Mit anderen Worten ist der Anteil an externen Rüstoperationen aus ökonomischer bzw. wertschöpfender Sicht zu maximieren. Die Umsetzung derartiger Maßnahmen resultiert in einer Glättung der Produktion, die sich wiederum durch stabile und flexible Produktionsvorgänge charakterisiert. Somit sind aufgrund einer verbesserten Kostenstruktur eine agile Reaktion auf Kundenwünsche und eine Senkung der Durchlaufzeiten sowie der Opportunitätskosten möglich.

3 Technologie-Entwicklung im Produktionsprozess

Um erfahrenen und insbesondere unerfahrenen Maschineneinrichtern auch auf Grundlage von Theorie und aktuellem Stand der Technik eine umfangreiche Arbeitsunterstützung gewährleisten zu können, müssen praktische, effiziente und nutzerzentrierte Methoden und Werkzeuge herangezogen werden. Die Ansätze und Methoden der Lean-Philosophie und der Industrie 4.0 bzw. des IIoT eröffnen im Zuge der digitalen Transformation und der damit einhergehenden Vielfalt an hoch technisierten Endgeräten – insbesondere Cyber-Physische Systeme und Head-Mounted Displays – vielfältige Möglichkeiten der physikalischen Prozessgestaltung, wie z. B. Augmented-Reality-Technologien (vgl. ZIDEK et al., 2020; BIRKHAN, 2008).

3.1 Augmented Reality (AR)

Der Idee der augmentierten Realität geht zunächst die virtuelle Realität bzw. „Virtual Reality“ (VR) voraus. Das Ziel der VR ist ein höchstmögliches Maß an sogenannter Immersion, d. h. ein Eintauchen in die virtuelle Realität bei weitgehender Trennung des Anwenders von der Wirklichkeit. Damit einher gehen allerdings hohe Leistungsanforderungen bei der Umsetzung solcher Systeme, da eine zeitgleiche Umsetzung von Interaktionen des Benutzers für eine möglichst reibungslose Anwendung unabdingbar ist. Die Asynchronität von Bild und Interaktion kann bspw. Kopfschmerzen und visuelle Probleme respektive Wahrnehmungsstörungen hervorrufen, die wiederum zu einem Unwohlsein und Übelkeit („Simulator Sickness“) seitens des Nutzers führen können (vgl. LÄNGER, 2017; FREUNDORFER, 2016).

Die Anfänge der AR-Technologien reichen bis in die frühen 1990er Jahre zurück (vgl. FEINER et al., 1993; CAUDELL & MIZELL, 1992). Schon bei ihren frühesten Entwicklungen wurde ihr Potenzial zur Verschmelzung nützlicher, virtueller bzw. digitaler Informationen mit der realen Umgebung sichtbar und nicht zuletzt durch das Aufkommen neuer Technologien, wie z. B. Tablets und Smartphones, zunehmend populärer. MILGRAM et al. (1995) setzen die Termini AR und VR zusammen mit der wahren Realität und der erweiterten Virtualität in Form eines Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums in Verbindung. Mischformen zwischen reiner Realität und reiner Virtualität wie die augmentierte Realität und die „Augmented Virtuality“, bei der eine virtuelle Situation mit Informationen aus der realen Umgebung angereichert wird, werden als „Mixed Reality“ beschrieben.

Im Zuge der Forschungsbestrebungen haben sich im Wesentlichen zwei Einsatzgebiete herauskristallisiert: die Kombination konventioneller Eingabemechanismen in Form von Tastatur und Maus mit Displays als Ausgabemechanismus (vgl. GAUGLITZ et al., 2014a) sowie die Verwendung von Touchscreens und HMDs in Verbindung mit Sprachbefehlen (vgl. GAUGLITZ et al., 2014b).

Neuere Entwicklungen konzentrieren sich auf die Verwendung von Gesten als mögliche Interaktionsmechanismen für AR-basierte Systeme (vgl. POLLALIS et al., 2017). Beide Einsatzgebiete zielen auf denselben Zweck ab: die immersive Wahrnehmung der realen Welt, angereichert mit virtuellen Komponenten.

Der Schwerpunkt bisheriger Forschungsarbeiten lag auf mobilen AR-Anwendungen zur Unterstützung einer synchronen lokalen oder remote-basierten Zusammenarbeit. Inhalte können z. B. in Form von Instruktionen „in situ“ (vgl. LANGLOTZ et al., 2012; HENRYSSON et al., 2005) oder mittels Tracking-Algorithmen telekollaborativ erstellt und verteilt werden (vgl. GAUGLITZ et al., 2012, 2014a, b). Weitere Entwicklungen letzterer Anwendung ermöglichen es Remote-Nutzern unabhängig vom Sichtfeld des lokalen Nutzers zu agieren und dennoch ortsbezogene Annotationen zu platzieren (vgl. GAUGLITZ et al., 2014b). Entsprechende Lösungen sind insbesondere bei komplexen Anweisungen einer einfachen Bedienbarkeit sowie einer erheblichen Aufgabenunterstützung zuträglich. Hardwareseitige Ausgabetechnologien für AR wurden in Form von Head-Mounted Displays (HMD), „Handheld Displays“ (HHD) und „Spatial Displays“ realisiert. Als HHD werden mobile Geräte, wie Tablets und Smartphones bezeichnet, die über eine Mindestanzahl technischer Komponenten (bspw. Kamera, WLAN, Bluetooth etc.) verfügen müssen. Ein Spatial Display visualisiert mithilfe von Projektoren AR-basierte Inhalte auf geometrische Formen aus der realen Umgebung (vgl. DÖRNER et al., 2019; FRAGA-LAMAS et al., 2018). In diesem Kapitel wird auf die Eigenschaften von HMDs Bezug genommen.

Eine große Herausforderung bei AR-Systemen ist die Gewährleistung der Wechselwirkung zwischen realer und digitaler Welt mit einer hinsichtlich der perspektivisch korrekten Überlagerung größtmöglicher Genauigkeit in Echtzeit. Um diese simultane Verfolgung von Geometrien zu ermöglichen, muss zunächst das reale Umfeld registriert werden. Zur Implementierung virtueller Objekte an Fixpunkten, werden hardwareseitig Tracker gefilmt, welche anschließend softwareseitig verarbeitet werden. Dazu werden vordefinierte Objekte als Orientierungshilfe in die Software eingebunden. Diese extrinsischen Parameter werden von einer Kamera aufgenommen. Die Software stellt die Überlagerung an der gewünschten Position zur Verfügung. Das kamerabasierte Tracking, das heutzutage aufgrund seiner hohen Genauigkeit und gleichzeitig großen Einsatzflexibilität für AR-Anwendungen gewählt wird, lässt sich in markerbasiertes Tracking und merkmalsbasiertes bzw. markerloses Tracking gliedern. Beim markerbasierten Verfahren werden in der Regel von der Kamera zuvor fest definierte Marker aufgenommen. Diese Marker haben eine spezielle Größe und sind je nach System schwarzweiß oder farbig und werden zugunsten einer besseren Erkennungsrate zusätzlich beleuchtet. Bei extra ausgeleuchteten Markern spricht man von aktiven Markern, bei unbeleuchteten von passiven Markern. Einzelne Marker bieten dem System die Information über eine Position, sodass zur Bestimmung der Position und Orientierung eines Objekts im Raum mehrere Einzelmarker benötigt werden. Durch das merkmalsbasierte Tracking werden Merkmale im Kamerabild erkannt. Am weitesten verbreitet ist dabei das geometriebasierte Tracking, bei dem markante Kanten und Eckpunkte extrahiert werden und mittels Abstandsberechnung zwi-

schen den Merkmalen die Grundlage für die Veränderung der Transformation bilden. Außerdem lassen sich die Verfahren darin unterscheiden, ob Kameras von außen auf die Objekte gerichtet werden („Outside-In“) oder die Kameras die Umgebung filmen und mit dem Objekt direkt verbunden sind („Inside-Out“) (vgl. DÖRNER et al., 2019).

3.2 Cyber-Physische Produktionssysteme

Aktuelle und frühere Forschungen haben gezeigt, dass neue Technologien, wie insbesondere Cyber-Physische Systeme, in einem sozio-technischen Kontext potenziell zahlreiche unterschiedliche Prozesse unterstützen und erleichtern können. CPS sind Systeme aus eng gekoppelten physischen und digitalen bzw. cyber-physischen Komponenten, die Software, Hardware, Sensoren und Aktoren integrieren. Die allgemeine Definition von CPS impliziert, dass sie verteilte Systeme, die aus physischen und virtuellen Einheiten bestehen, verbinden und verwalten können (vgl. LEE et al., 2015). Ihre charakteristischen Merkmale sind die Vernetzung verschiedener Produktionskomponenten, wie Maschinen oder Werkzeuge, sowie die sie charakterisierenden Datensätze (vgl. GALLAGHER, 2010). Die Interaktion mit solchen Systemen erfolgt über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die durch herkömmliche PC-Schnittstellen, Touchscreens oder beschriebene AR-basierte Technologien realisiert werden kann.

Die Anwendungsmöglichkeiten von Sensortechnologie als zentrales Merkmal von CPS bzw. CPPS sind vielfältig. Im industriellen Kontext hat sie bspw. das Potenzial, Bereiche zu kontrollieren, die für Menschen unzugänglich sind (vgl. CHONG et al., 2003) und zusätzliche Informationen verschiedener Art bereit zu stellen (vgl. GELLESEN, 2005). Neben einer Sensor-zu-Sensor-, einer Sensor-zu-Aktor- und einer Aktor-zu-Aktor-Beziehung (vgl. HU et al., 2016; MARSEU et al., 2016) wurde eine Aktor-zu-Sensor-Interaktion bisher nicht betrachtet. CHEN & TSAI (2017) befassen sich z. B. mit dem Einsatz von Sensoren in der Fertigung hinsichtlich RFID (Radio Frequency Identification) und Auto-ID. Die Art des Einsatzes hängt wesentlich von der Dynamik des physikalischen Prozesses und dem Grad seiner Automatisierung ab. Sensoren können einerseits ohne eine menschliche Schnittstelle über eine Wissensgrundlage kommunizieren, die artefaktbasiertes Wissen (Daten und Regeln für deren Verarbeitung) über den aktuellen Zustand der Umgebung beinhaltet (vgl. STROHBACH et al., 2004). Andererseits können CPPS auch vollständig durch den Menschen überwacht werden. Dazu ist zu klären, wie Daten die richtigen Informationen für den richtigen Zweck zur richtigen Zeit an die richtige Person liefern können (vgl. LEE et al., 2013).

Beispiele für CPPS-Anwendungen finden sich in zahlreichen Bereichen: Leistungselektronik, Luft- und Raumfahrt, Verteidigung bzw. Militär, Energiesysteme sowie Gesundheits- und Verkehrswesen (vgl. HU et al., 2016). Im industriellen Kontext stellen CPPS eine Antwort auf die fortschreitende Mechanisierung und Vernetzung von Maschinen und Sensoren dar, die zu großen

Datenmengen („Big Data“) führen (vgl. KAGERMANN et al., 2013). Derartige Systeme werden u. a. für automatische Erkennungs- und Ferndiagnosesysteme (vgl. CHEN & TSAI, 2017), Entwicklungs- und Betriebsphasen in der Produktion (vgl. HERTERICH et al., 2015) sowie für die Lokalisierung von Trends und Möglichkeiten der Optimierung (vgl. SHI et al., 2011) eingesetzt. Weitere Forschungen beziehen sich auf die Softwareentwicklung für Smart Factories (vgl. DEPPE et al., 2022; OTTO et al., 2014) und CPS-basierte Modellierung (vgl. THRAMBOULIDIS & CHRISTOULAKIS, 2016).

Es bestehen potenzielle Schwierigkeiten und Herausforderungen, die sich aus der Verschmelzung der Interaktion zwischen physischen und virtuellen Welten ergeben, z. B. hinsichtlich der beschriebenen Einbindung von Sensoren, die autark bzw. über eine schlanke Infrastruktur ohne externe Schnittstellen oder vollständig mit menschlichen Schnittstellen erfolgen kann. Diese und weitere Umstände führen zu einer erhöhten interaktionellen und technischen Komplexität. Für neuartige Systeme müssen Prototyping-Tools entwickelt werden, um den Ideenfindungsprozess und das nutzerzentrierte und partizipative Design zu unterstützen (vgl. PAELKE & RÖCKER, 2015; MONOSTORI, 2014). Das gilt auch hinsichtlich der Anwendbarkeit von CPPS und Industrie 4.0-Konzepten für KMU (vgl. LUDWIG et al., 2016). Dabei soll zur Sicherstellung einer ergonomischen Gebrauchstauglichkeit interaktiver Systeme die u. a. in der DIN EN ISO 9241-210 (2020) postulierte „Usability“ beachtet werden. Nach dieser Norm ist Usability als das „Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ definiert. Eine weitere Herausforderung ist durch die Schwierigkeit gegeben, Wissen von Experten respektive Fachkräften in Programmcodes umzuwandeln (vgl. BRACHT et al., 2011). Weitere Spannungsfelder betreffen außerdem Qualitätsanforderungen, Mitarbeiterqualifikation und Mensch-Maschine-Kooperation (vgl. LUDWIG et al., 2016). Um diesen Herausforderungen zu begegnen, stellen diesbezüglich bspw. LEE et al. (2015) eine Struktur und Architektur vor, die von der Datenerfassung über die Analyse bis hin zur endgültigen Wertschöpfung reicht und als Leitfaden für die Umsetzung von CPPS dienen soll. Praktische Anwendungen und Techniken ergänzen die theoretische, auf entsprechend fünf Ebenen basierende Architektur mit praxisnahen Umsetzungsmöglichkeiten.

Die Forschung zur praktischen Anwendung von AR-basierten Cyber-Physischen Systemen, insbesondere in Form von Datenbrillen oder Head-Mounted Displays, gilt nach wie vor als unterrepräsentiert. Gleichzeitig zeigt sie deren Potenzial auf (vgl. BHATTACHARYA & WINER, 2019). Aufgrund des relativ frühen Entwicklungsstadiums weisen einige von ihnen z. T. (interaktions-) ergonomische Limitierungen sowohl hinsichtlich der konstruktiven als auch der hardware- und

softwareseitigen Applikations-Gestaltung auf, die zwangsläufig die Nutzerakzeptanz beeinflussen (vgl. u. a. COMETTI et al., 2018).

3.3 Head-Mounted Displays bzw. Datenbrillen

Ein HMD oder eine Datenbrille stellt ein Anzeigegerät dar, d. h. eine lose oder am Kopf befestigte Brille, die Informationen entweder auf einen integrierten, augennahen Bildschirm oder direkt auf die Netzhaut projiziert (vgl. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014). Mit fortschreitender Entwicklung der Computertechnologie wurde das Zusammenspiel von HMD mit Virtueller Realität zur interaktiven, intuitiven und verständlichen Darstellung von Informationen in einer geschlossenen, virtuellen Computerwelt verstärkt erforscht (vgl. STANNEY, 2002). Darüber hinaus bedienen sich HMD neben VR der beschriebenen AR-Technologie, die anhand des HMDs innerhalb der Realumgebung des Menschen virtuelle Elemente respektive digitalisierte Informationen in das Sichtfeld des Nutzers projiziert. Informationen verbleiben unabhängig von Sitz- bzw. Körperposition im Blickfeld des Nutzers, wodurch eine durchgängige Interaktion – haptisch, auditiv oder gesten-gesteuert – möglich ist.

Die Implementierung derartiger Systeme zielt im betrieblichen Kontext, bspw. in Bezug auf Montage- oder Instandhaltungsvorgänge, u. a. darauf ab, einen permanenten Qualitätsstandard mittels einer prozessbegleitenden Verfügbarkeit von Informationen zu ermöglichen (JENSEN et al., 2007). Datenbrillen können durch unterschiedliche Anforderungen an Technik, Software, Aufgabengestaltung und letztlich Anwendung auch als kognitive Assistenzsysteme verstanden werden, die wiederum als Hilfesystem zur Bereitstellung von Wissen bzw. Arbeitsanweisungen, als adaptives Assistenzsystem zur sensorischen Erfassung und Anleitung von Arbeitstätigkeiten sowie als tutorielles Assistenzsystem zur lernförderlichen Arbeitsgestaltung fungieren (vgl. APT et al., 2018).

Einheitliche Definitionen zu den unterschiedlichen HMD-Typen sind weder in Normen noch in der Fachliteratur zu finden. Aufgrund ihrer Bauart lassen sich HMDs jedoch gemäß den Fachinformationen (FI) „Nr. 0065“ der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) in drei Kategorien unterteilen (vgl. BGHM-FI Nr. 0065, 2019):

1. Binokulare, geschlossene VR-Brillen: Interaktion mit VR-Inhalten isoliert von der realen Umwelt;
2. Monokulare (AR-)Datenbrillen („Look-Around“-HMD): Visualisierung von augmentierten Informationen auf einem Auge, sodass der Nutzer nur teilweise von der realen Umwelt isoliert ist;

3. Binokulare AR-Brillen („See-Through“-HMD): Augmentierte Informationen können zusätzlich zur realen Umwelt mit beiden Augen unter eingeschränkter Isolation wahrgenommen werden.

Neben einer prozessbegleitenden und mobilen Anwendung mit freien Händen, einer sprach- und gesten-basierten Interaktion bzw. Steuerbarkeit sowie der Anbindungsmöglichkeit und Darstellung prozessrelevanter und ggf. nicht einsehbarer Daten sind auch u. U. ein eingeschränktes Blickfeld sowie physische und psychische respektive kognitive Mehrbeanspruchungen Aspekte, die mit der Nutzung eines HMD einhergehen.

Im Zuge des Forschungsprojekts „Cyberrüsten 4.0“ wurde am Beispiel von industriellen Rüstvorgängen an Umform- bzw. Biegemaschinen eine prototypische Applikation für eine Mixed-Reality-Technologie unter Verwendung der Microsoft® „HoloLens“ entwickelt und evaluiert. Mit Hilfe dieses HMD können prozessrelevante Informationen holografisch und kontextspezifisch in das reale Sichtfeld des Nutzers projiziert und mit internen sowie externen Sensordaten und Simulationen angereichert werden.

3.3.1 Untersuchungsgegenstand Microsoft® „HoloLens“

Der Terminus „Mixed Reality“ wurde maßgeblich durch Microsoft® geprägt. Die im Jahr 2016 erschienene „HoloLens“ der ersten Generation ist ein binokulares Windows-10-betriebenes Head-Mounted Display (siehe Abb. 3.1).



Abb. 3.1: Microsoft® HoloLens der ersten Generation (N.N., 2018a)

Die Brillen-Optik setzt sich aus zwei lichtdurchlässigen holografischen Linsen zusammen. Durch eine eigens von Microsoft[®] entwickelte „holografische“ Prozessoreinheit (Holographic Processing Unit, HPU), die mit einem TPM (Trusted Platform Module)-2.0-Mikrochip einer 32-Bit-Architektur von Intel gekoppelt ist, mitsamt verschiedener Sensoren (Tiefenkameras, Umgebungs- und Trägheitssensoren etc.), einem eigenen Akkumulator sowie mehrerer elementarer Ein- und Ausgabe- bzw. Konnektivitätskomponenten (Wi-Fi, Micro-USB- und Bluetooth-Schnittstellen, integrierte Lautsprecher, haptische Bedienelemente oder Funktionsschalter etc.) kann das System autark verwendet werden. Mit einer holografischen Auflösung von 2,3 Mio. Lichtpunkten und einer holografischen Dichte von über 2.500 Lichtpunkten pro Radianten werden hochauflösende dreidimensionale Hologramme erzeugt. Diese werden in die direkte respektive reale Umgebung des Anwenders in einer durch das augenbasierte Rendering automatisch kalibrierten Entfernung auf das Visier der Brille projiziert.

Die Interaktion mit der HoloLens erfolgt mittels des „Natural-User-Interface“, d. h. über Sprach- und Gestensteuerung (vgl. N.N., 2022). Sie kann jedoch auch über ein kabelloses Eingabegerät, den sogenannten „Clicker“, durchgeführt werden. In dem 120 °-Sichtfeld der HoloLens („Gesture Frame“) können zwei wesentliche Gesten-Steuerungen erkannt werden: „Air-tap“ und „Bloom“. Bei der Air-tap-Ausführung wird zunächst ein Arm kranial-ventral auf Gesichtshöhe ausgelenkt. Anschließend soll sich der erhobene Zeigefinger wie bei einem „Mausklick“ in kaudale Richtung bewegen, um dann wieder in die Ausgangsposition zurückzukehren. Die HoloLens erkennt die Blickrichtung des Nutzers durch den sogenannten „Gaze“ oder „Gaze Point“. Der fixe Punkt, der sich in der Mitte des Sichtfelds befindet und nur mit Kopfbewegungen (nicht via Eye-Tracking) gesteuert werden kann, ist entsprechend mit der Funktionsweise eines Maus-Cursors vergleichbar. Ein Objekt kann ausgewählt bzw. angeklickt („Short Tap“) oder, vergleichbar mit einer gedrückten linken Maustaste, gezogen werden („Long Tap“). Durch die „Bloom“-Geste kann der Nutzer darüber hinaus das Hauptmenü öffnen. Dafür wird die Hand zunächst zu einer Faust geballt und anschließend geöffnet.

Die Brille wird wie eine optische Sehhilfe auf die Nase des Anwenders aufgesetzt. Zur Befestigung des Kopfträgers wird ein Drehrad am hinteren Ende der Brille betätigt, um durch die damit verbundene Spannvorrichtung eine Verkleinerung der Kopföffnung zugunsten einer ausreichenden Fixierung am menschlichen Kopf zu gewährleisten. Darüber hinaus besteht für eine zusätzliche Stabilisierung die Möglichkeit ein Befestigungsband einzusetzen, das über den oberen Teil des Schädels gespannt und an beiden Seiten des HMDs befestigt wird. Die HoloLens liegt somit an Nase, Stirn, Schläfe, Hinterkopf und Schädeldach des Nutzers an.

Das Gewicht der HoloLens beträgt aufgrund der aufwendigen technischen Ausrüstung 579 Gramm (vgl. CZERULLA & JANSSEN, 2016). Nach offiziellen Angaben variiert die Akkulaufzeit je nach Nutzungsszenario lediglich zwischen 2,5 und 5,5 Stunden (vgl. BEIERSMANN, 2016; BERG & SCHMIDT, 2016). Erfahrungsberichte kritisieren außerdem übereinstimmend das mit 120 ° (zu) kleine Sichtfeld für den Anwender (vgl. CZERULLA & JANSSEN, 2016; BERG & SCHMIDT, 2016; KOLBOW-LEHRADT, 2016). Weitere bzw. ausgewählte Features der im Zuge der Studien als Untersuchungsgegenstand dienenden HoloLens werden in den Ergebnisdarstellungen hinsichtlich deren Auswirkungen auf den Menschen detailliert beschrieben.

Die HoloLens weist durch ihre Eigenschaften ein potenziell breites Einsatzspektrum auf. Neben den industriellen Arbeitsvorgängen, wie z. B. für Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten von Maschinen (vgl. N.N., 2019a), Flugsystemen (N.N., o.J.c) oder Kraftfahrzeugen (KRAUSS, 2019), wird die HoloLens auch im Zuge von Rüstprozessen (vgl. RADKOWSKI & INGEBRAND, 2017), bei der Erstellung rechnerunterstützter Konstruktions-Modelle zur Standardisierung von Arbeitsabläufen (vgl. KRAUSS, 2019) oder bei der Durchführung von Montageaufgaben (vgl. EVANS et al., 2017) zugunsten einer Fehlerreduktion (vgl. BLATTGERSTE et al., 2017) genutzt. Außerdem können logistische Tätigkeiten, wie die Kommissionierung, die Erstellung und Darstellung von Verpackungsanweisungen sowie Qualitätskontrollen, unterstützt werden (vgl. HANSON et al, 2017). Die HoloLens wird zudem als „Rückmeldeterminale“ für ein Enterprise-Resource-Planning (ERP)-System herangezogen (vgl. HOLZWART, 2017). Die unablässige Modernisierung von technischen Geräten bringt weitere im Vergleich zur HoloLens der ersten Generation konstruktiv und technologisch überarbeitete Systeme hervor. Für eine industrielle Anwendung eignen sich bspw. u. a. das Nachfolgemodell der HoloLens („HoloLens 2“), die „HMT-1“ der Firma RealWear oder die Datenbrille „Vuzix M400“ (vgl. N.N., 2021).

3.3.2 *Rechtliche Anforderungen für den Einsatz von HMDs bzw. Datenbrillen*

Nach wie vor werden Datenbrillen bzw. HMDs in der Holz- und Metallbranche als neuartiges Arbeitsmittel betrachtet. Durch eine Vielzahl an potenziellen Anwendungsbereichen müssen Gestaltungsprinzipien und mögliche Gefährdungen in der Praxis nachhaltig erprobt werden. Das Arbeitsschutzrecht gibt aktuell keine spezifischen Regelungen für den Arbeitsprozess mit Datenbrillen vor. Die Begriffe „Head-Mounted Display“ respektive „Datenbrille“ werden weder in der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) noch in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) ausdrücklich erwähnt. In Normungen werden lediglich Einzelkomponenten, wie Display, Strahlung,

etc. beschrieben. Vergleichend dazu werden Tablets gemäß der ArbStättV als „mobile bzw. tragbare Bildschirmgeräte“ kategorisiert. Die Datenbrille ist jedoch im Bundesteilhabegesetz (BTHG) als „technische Arbeitshilfe“ definiert.

Laut Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) sind Arbeitgeber zumindest dazu verpflichtet, bei der Nutzung von HMDs eine Beurteilung solcher Gefahren durchzuführen, die vom Endgerät selbst ausgehen sowie durch Wechselwirkung mit Arbeitsmitteln respektive der Arbeitsumwelt entstehen und mit persönlicher Schutzausrüstung kompatibel sind. Ergänzend dazu müssen sie softwareergonomische Mindestanforderungen für ihre Bildschirmarbeitsplätze bzw. Systeme prüfen und letztlich sicherstellen. Als gesetzliche Grundlage dient hierbei die ArbStättV, welche die Bildschirmarbeitsverordnung (BildscharbV) im Jahr 2016 ablöste. Sämtliche tragbare Bildschirmgeräte müssen nun folgende Anforderungen erfüllen (ArbStättV, Anhang 6.5):

„(1) Beim Betreiben der Bildschirmarbeitsplätze hat der Arbeitgeber dafür zu sorgen, dass der Arbeitsplatz den Arbeitsaufgaben angemessen gestaltet ist. Er hat insbesondere geeignete Softwaresysteme bereitzustellen.

(2) Die Bildschirmgeräte und die Software müssen entsprechend den Kenntnissen und Erfahrungen der Beschäftigten im Hinblick auf die jeweilige Arbeitsaufgabe angepasst werden können.

(3) Das Softwaresystem muss den Beschäftigten Angaben über die jeweiligen Dialogabläufe machen.

(4) Die Bildschirmgeräte und die Software müssen es den Beschäftigten ermöglichen, die Dialogabläufe zu beeinflussen. Sie müssen eventuelle Fehler bei der Handhabung beschreiben und eine Fehlerbeseitigung mit begrenztem Arbeitsaufwand erlauben.

(5) Eine Kontrolle der Arbeit hinsichtlich der qualitativen oder quantitativen Ergebnisse darf ohne Wissen der Beschäftigten nicht durchgeführt werden.“

Die Anpassung der Datenbrille an sozial- und datenschutzrechtliche Regelungen muss derart konzipiert sein, dass persönliche Freiheitsrechte der Mitarbeiter nicht verletzt werden. In Europa ist diese Anforderung durch die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) in Bezug auf den Schutz personenbezogener Daten gewährleistet. Viele Hersteller von HMDs entwickeln ihre Brillen in den USA, da DSGVO-ähnliche Gesetzmäßigkeiten nicht greifen. Demnach haben sie mehr Handlungsspielraum bei der Übertragung und Speicherung personenbezogener Daten. Aus wirtschaftlicher Sicht beeinflussen solche gesetzlichen Bedingungen die Marktposition von HMDs und sorgen auf globaler Ebene für einen starken Wettbewerb.

Auch wenn aufgrund der hohen Produktvarianz derzeit keine allgemeingültigen Richtlinien und Gesetze bestehen, sollte als Grundvoraussetzung gelten, dass der Nutzer die Datenbrille freiwillig trägt und selbst bestimmt, wann er sie nutzt. Diese Bestimmung gilt auch für Dritte, welche das HMD zwar nicht nutzen, sich jedoch in einem etwaigen Aufzeichnungsradius befinden (vgl. ABEND, 2019). Weiterhin lassen sich erste Anhaltspunkte für die Bewertung der Brille aus dem Anhang 6.4 „Anforderungen an tragbare Bildschirmgeräte für die ortsveränderliche Verwendung an Arbeitsplätzen“ nach § 3 Abs. 1 der ArbStättV und aus den „Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) 1151 – Gefährdungen an der Schnittstelle Mensch-Arbeitsmittel“ entnehmen. Daraus gehen bspw. Richtwerte für Form, Größe und Gewicht eines HMD vor. Auch Richtlinien zur Displaybeschaffenheit und Kontrastverhältnissen sind darin verankert. Die Produktsicherheit ist Teil der europäischen Produktpolitik und kommuniziert, dass kein Produkt eine Gefahr für die Gesundheit oder die Sicherheit des Nutzers oder für andere Beteiligte darstellen darf. Um gesundheitliche Risiken zu verringern, sollten Richtlinien zur elektromagnetischen Strahlung, zu Displays und zur „Ergonomie der Mensch-System-Interaktion“ bei der Gestaltung eines HMDs stets berücksichtigt werden.

4 Nutzerzentriertes Design cyber-physischer Hilfsmittel für wissensintensive (Rüst-)Prozesse

Menschliche Praktiken sind insbesondere darauf zurückzuführen, dass sich die Umwelt kontinuierlich verändert. Diese Handlungen sind oftmals durch Wissen geleitet und werden durch Artefakte vermittelt (vgl. ROHDE et al., 2016). Diese vermittelten mentalen und physischen Handlungen resultieren in routinierten Mustern, die wiederum dazu verwendet werden, kontingente Aktivitäten normativ zu gestalten (vgl. WULF et al., 2015; SCHMIDT, 2014). Das praxisorientierte Computing legt besonderes Augenmerk auf den sich in der Praxis vollziehenden Dialog zwischen Wissen, Artefakten und Handlungen. Innerhalb dieses Paradigmas wird „Design“ als das Ergebnis einer kreativen Tätigkeit verstanden, bei der das Wissen, die Artefakte und die Handlungen gemeinsam etwas Neues schaffen (vgl. STEVENS et al., 2018). Design entsteht als ein vielschichtiger Eingriff in die Praxis, der zu nützlichen und brauchbaren Hilfsmitteln für den Nutzer führt, um bestimmte Ziele zu erreichen oder bestimmte Aufgaben zu erfüllen (vgl. ROHDE et al., 2016) – bspw. zur Unterstützung von Maschineneinrichtern an Biegemaschinen. Trotz des in der Literatur aufgezeigten Potenzials cyber-physischer Hilfsmittel für den Transfer von Wissen bzw. Know-how wird in diesem Zusammenhang nur unzureichend beleuchtet, wie dieser Sachverhalt tatsächlich auf die Bedürfnisse und Anforderungen der Nutzer reagiert.

4.1 Stand der Forschung zum Transfer von Wissen und Erfahrung

In dem Fachbereich der „Computer-Supported Cooperative Work“ (CSCW) ist das Thema „Wissen- und Erfahrungstransfer“ seit den späten 1980er-Jahren ein immer wiederkehrendes Thema. Von Beginn an lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung von jederzeit und für jedermann zugänglichen Systemen, welche die Konzipierung eines „organisatorischen Gedächtnisses“ unterstützen sollten (vgl. ACKERMAN, 1998). Die Forschungsarbeit warf zunächst Fragen bezüglich der Dichotomie von (Fach-)Experten und Anwendern und der damit einhergehenden Problematik der Kontextualisierung von im System gespeicherten Wissen sowie mit der Verwendung entsprechender Systeme verbundene Autorenarbeitsaufwände zur Systempflege auf (vgl. ACKERMAN & MCDONALD, 1996). Das organisatorische Gedächtnis impliziert eine Konzeptualisierung von „Fähigkeiten“, „Wissen“ und „Gedächtnis“. Das Verständnis des sozialen Kontextes, in dem der Prozess des „Erinnerns“, d. h. der Zugriff auf Informationen und deren Nutzung, tatsächlich stattfindet, ist für wissensintensive Prozesse bzw. Aktivitäten von elementarer Bedeutung (vgl. RANDALL et al., 1996). Somit wurde der Forschungsschwerpunkt auf die Unterstützung von Interaktionen im Zusammenhang mit der Weitergabe von Wissen und Fachkenntnissen sowie auf die (Hilfs-)Mittel

gelegt, mit denen Wissen zwischen sachkundigen Akteuren geteilt wird (vgl. ACKERMAN et al., 2013).

Wenn Menschen bestimmte Aufgaben ausführen, müssen sie auf praktische Fähigkeiten und implizites Wissen zurückgreifen (vgl. POLANYI, 1967). Dieses Wissen wird auch als *tazites* oder *stilles Wissen* bezeichnet, das nicht explizit formuliert bzw. erklärt werden kann (vgl. ACKERMAN et al., 2013; SCHMIDT, 2012). Das Erlernen und die Durchführung praktischer Aufgaben, die sich jeder propositionalen Formulierung des bei ihrer Bewältigung ausgeübten Wissens widersetzen, wurden in der Literatur als „*Know-how*“ bezeichnet (vgl. RYLE, 1945, 2009). Ein Verständnis von Aufgaben, das in propositionaler Form diskutiert werden kann, wurde als „*Know-that*“ bezeichnet (vgl. RYLE, 1945, 2009), oft in Verbindung mit „*Know-why*“ (vgl. LAPRÉ et al., 2000). Diese Aspekte sind für Produktionsprozesse von besonderer Bedeutung, da sie sich auf die Vermittlung der Art und Weise auswirken, wie Produktionstätigkeiten durchgeführt werden sollten, wie sie dargestellt und mit anderen Arbeitspersonen geteilt werden können, die ähnliche Tätigkeiten ausüben.

Wissensmanagement ist eine wichtige strategische Ressource, durch die Wettbewerbsvorteile am Markt generiert werden können. Zahlreiche Studien aus verschiedenen Bereichen haben zur Erforschung der umfassenden Thematik beigetragen (vgl. ACKERMAN et al., 2013; WATSON & HEWETT, 2006; GRANT & BADEN-FULLER, 2004; ARGOTE & INGRAM, 2000; ARGOTE et al., 2000; SPENDER, 1996). Im Bereich des CSCW wurde u. a. die Rolle von Informationen in organisatorischen und sozialen Kontexten mit einem Fokus auf die Weitergabe bzw. gemeinsame Nutzung von Wissen durch sachkundige Mitarbeiter in sicherheitskritischen Arbeitsumgebungen und im administrativen Bereich untersucht (vgl. ACKERMAN et al., 2013). Weiterhin analysierten RANDALL et al. (1996) das organisatorische Gedächtnis dahingehend, wie „*lokales Wissen*“ in Abhängigkeit von der Position der Person artikuliert wird. In einigen Arbeiten wird auch untersucht, wie der Wissenstransfer innerhalb und zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Gemeinschaften erfolgt (vgl. VELDEN, 2013), wobei in diesem Zusammenhang der Einfluss persönlicher Interessen eine große Rolle spielt. Dazu erforschten HARPER et al. (2001), wie (Arbeits-)Dokumente geteilt und wiederverwendet werden. Die Fachrichtung der „*Human-Computer Interaction*“ (HCI) betrachtet den Themenbereich insbesondere im Hinblick auf die Gestaltung digitaler Visualisierungstechnologien für den Wissenstransfer. Zugehörige Studien bezogen sich insbesondere auf das Lehren und Lernen (vgl. PATTERSON et al., 2014) oder Informationsüberlastungen („*Information Overload*“, vgl. MENGIS & EPPLER, 2012). Bemerkenswert wenige Studien befassen sich mit dem Transfer von Wissen innerhalb praxisnaher Produktionsbereiche. Die wissenschaftlichen

Arbeiten, die im Forschungsbereich des CSCW Praktiken in industriellen (Produktions-)Umgebungen beobachteten, wie z. B. bei der Produktionsplanung (vgl. CARSTENSEN et al., 1999), in einer Papierfabrik (vgl. ROBINSON et al., 2000) oder in einem Stahlwerk (vgl. CLARKE et al., 2003), konzentrieren sich jedoch nicht auf den Wissenstransfer. In den Forschungsbereichen des Organisations- und Informationsmanagement sind Ausarbeitungen auf Prozesse der Wissensgenerierung und -verwaltung ausgerichtet. Ein Großteil der Arbeiten stützt sich auf das POLANYI's (1967) Konzept des impliziten Wissens, das seit den späten 1980er-Jahren von NONAKA (vgl. NONAKA, 1988; NONAKA et al., 2000; NONAKA & TAKEUCHI, 1995; NONAKA & VON KROGH, 2009) vorangetrieben wurde. In diesen Studien werden Organisationen sowohl als informationsverarbeitende Maschinen als auch als Einheiten betrachtet, die durch das Handeln und die Interaktion ihrer Komponenten Wissen erzeugen (vgl. NONAKA et al., 2000). Um das Verständnis dieses Prozesses für ein erfolgreiches Wissensmanagement zu erreichen, haben NONAKA et al. (2000) mit dem sogenannten „SECI“-Modell eine wissensbasierte Theorie entwickelt.

Das SECI-Modell stellt eine spiralförmige Modellierung dar, die vier Prozesse der „Wissensumwandlung“ umfasst: Sozialisierung (Socialization), Externalisierung (Externalization), Kombination (Combination) und Internalisierung (Internalization). Im Zuge der Sozialisierung wird die Weitergabe von Wissen zwischen Individuen normalerweise durch direkte soziale Interaktion, Beobachtung und Nachahmung ausgehandelt. Externalisierung beschreibt den Prozess, bei dem die Akteure versuchen, implizites Wissen durch (sprachliche) Artikulation in explizites Wissen umzuwandeln. Bei der Kombination werden explizite Wissens Elemente auf verschiedenen Ebenen ausgetauscht, verknüpft und angereichert. Hier wird explizites Wissen, das oft durch Dokumente oder elektronische Kommunikation artikuliert wird, zwischen Individuen transferiert. Bei der Internalisierung versuchen die Wissenssuchenden, explizites Wissen zu verinnerlichen (vgl. NONAKA et al., 2000). Dies ist ein schwieriger, jedoch unvermeidlicher und wichtiger Aspekt bei der Generierung von neuem Wissen. Er tritt nur dann auf, wenn vorhandenes (Erfahrungs-)Wissen durch Prozesse der Sozialisierung, Externalisierung und Kombination verinnerlicht wurde (vgl. DÖRING, 2016). Zur Internalisierung zählen Methoden wie „Learning-by-doing“, Simulationen oder Experimente (vgl. HOFFMANN, 2009).

Keine der beschriebenen Studien untersucht demnach die Rolle der gemeinsamen Nutzung von wissensintensiven Praktiken, Fachwissen und des Wissenstransfers in Umgebungen, in denen technische Hilfsmittel eine immer wichtigere Rolle spielen, wie z. B. bei industriellen Rüstprozessen. Vielmehr liegt der Schwerpunkt oftmals auf der Ausarbeitung von Modellen, die sich auf eine organisatorische Wissensschöpfung oder auf Motivationsaspekte zur Realisierung eines erfolgreichen Wissenstransfers beziehen (vgl. NONAKA et al., 2000). Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass das von Experten erworbene Wissen und Know-how so oft wie nötig von Anfängern bzw. weniger erfahrenen Mitarbeitern genutzt und wiederverwendet werden kann. Die primäre Problematik hinsichtlich einer gemeinsamen Nutzung von Wissen besteht darin, das implizite Wissen zu explizieren (vgl. ACKERMAN et al., 2013; SCHMIDT, 2012). ACKERMAN & HALVERSON (2004) weisen in diesem Zusammenhang auf die Bedeutsamkeit der Aneignung eines detaillierten empirisch

fundierten Verständnisses der mit dem Wissenstransfer verbundenen Praktiken hin. Praktiken werden als „Wege des Handelns“ betrachtet und setzen zumeist kontextabhängiges Wissen voraus (vgl. SCHMIDT, 2014). Diese Sachverhalte unterstreichen die Bedeutsamkeit der Untersuchung zur gemeinsamen Nutzung von propositionalem und nicht-propositionalem Wissen. Propositionales Wissen impliziert deklaratives Wissen, das leicht verständliche Fakten beschreibt und daher im Rahmen eines Wissenstransferprozesses schnell zugänglich ist. Nicht-propositionales Wissen ist oftmals in verkörperten bzw. nicht-verbalisierbaren Handlungen („Embodied Actions“) eingebettet und wird erst durch bestimmte Merkmale seiner Verkörperung oder durch Handlungen, die es in die Praxis umsetzen, sichtbar (vgl. GALLAGHER, 2010).

„Embodied Action“

Forschungsarbeiten respektive Begriffsdefinitionen zu „Embodied Action“ reichen von Merleau-Ponty’s Philosophie der Verkörperung (vgl. GALLAGHER, 2010) über die „Philosophischen Untersuchungen“ (WITTGENSTEIN, 1953) bis hin zu ethnomethodologischen Sichtweisen (vgl. LYNCH, 1997). Wissen und Handeln, das sich zwangsläufig in „verkörperten“ Aktionen ausdrückt, sind miteinander verbunden. Ein wesentlicher Forschungsaspekt ist jedoch darauf ausgerichtet, wie sich Wissen im Handeln widerspiegelt und wie verkörpertes Handeln in der Praxis in möglichst hoher Qualität dargestellt werden kann.

Neben einem wechselseitigen Einfluss von Aktion und Interaktion in der virtuellen und physischen Welt (vgl. HEATH & LUFF, 1991) können sich verkörperte Handlungen auch im Umgang mit physischen Artefakten manifestieren, z. B. bei der Erstellung physischer Repräsentationen (Schreiben und Zeichnen auf Papier), oder der tatsächliche Gebrauch physischer Objekte (Arbeiten mit Computern, Lesen etc.) (vgl. BROWN & DUGUID, 1994). In Bezug auf andere Subjekte sind das Senden und Empfangen von „Zeichen“ in Form visueller Indikatoren wesentlich. Dazu gehören u. a. spezifische Körperhaltungen, Gestik und Mimik sowie orale bzw. akustische Indikatoren, d. h. Sprechen und andere (externe) Geräusche (vgl. KENDON, 1990). Die Unterstützung derartiger „Embodied Actions“ ist weitreichend und bedarf neben der (einfachen) Erfassung propositionaler Inhalte (z. B. über Videoaufnahmen) auch neuartiger technologischer Hilfsmittel, bspw. in Form von Sensorik. Die Schwierigkeit der Erfassung des in Praktiken eingebetteten nicht-propositionalen Wissens ist durch mehrere Aspekte begründet. Zeitliche Engpässe (vgl. SCHMIDT, 2012), die Privatsphäre und die durch Wissen erworbenen Alleinstellungsmerkmale (vgl. NONAKA, 1994) können der Wissensarchivierung entgegenstehen. Weiterhin sind didaktische Barrieren hinsichtlich einer generischen Darstellung der Informationen zu überwinden, um „Know-how“ für jeden Einzelnen verständlich zu machen (vgl. SCHMIDT, 2012).

4.2 Nutzung von AR-Technologien und Cyber-Physischen Produktionssystemen

Augmented-Reality-Systeme und CPPS können in Verbindung mit Sensortechnologien in wissensintensiven Umgebungen helfen, einen schnellen, uneingeschränkten und kontextspezifischen Zugang zu Informationen zur Unterstützung von Lernprozessen herzustellen (KLOPPER et al., 2005). Sie können unter Berücksichtigung eines Einsatzes im sozio-technischen Kontext potenziell zahlreiche verschiedene Prozesse unterstützen sowie erleichtern und sind in diesem Zusammenhang Ansätze zum innovativen Handling wissensintensiver Prozesse zugunsten effizienter Arbeitspraktiken (vgl. PAELKE & RÖCKER, 2015). Insbesondere gilt dieser Sachverhalt für nicht-propositionales Wissen, z. B. in Form verkörperter bzw. nicht verbalisierbarer Handlungen. Das in verkörperten Handlungen eingebettete Wissen kann durch AR-Techniken aufgezeichnet und visualisiert werden (vgl. ZIDEK et al., 2020; POLLALIS et al., 2017; GALLAGHER, 2010). In den Forschungsbereichen der HCI und der CSCW wurde der Austausch von Wissen insbesondere hinsichtlich der Alltagspraktiken von Arbeitnehmern und weniger in Bezug auf die gemeinsame Nutzung von Wissen und Fachkenntnissen betrachtet (vgl. ACKERMAN et al., 2013). Im Gegensatz zu den Bereichen des Organisations- und Prozessmanagements (vgl. HAU et al., 2013; NONAKA & TOYAMA, 2003; SPENDER, 1996; ARGOTE et al., 1990) wurde die Bedeutung innovativer Methoden zur Optimierung der Erfassung und Dokumentierbarkeit sowie der Förderung des Wissenstransfers unter Kollegen für industrielle Kontexte vernachlässigt (vgl. CLARKE et al., 2003).

Die Technologie ermöglicht neben einer aus unterschiedlichen Blickwinkeln erfolgenden Darstellung von Lehrinhalten auch eine Förderung des Anlernprozesses, sofern keine realen Erfahrungen aus erster Hand vorliegen. Außerdem wird der kollaborative Prozess zwischen erfahrenen Arbeitspersonen und anzulernenden respektive unerfahrenen Mitarbeitern verbessert und letztere bei der Kontrolle ihrer Lerngeschwindigkeit und methodischen Herangehensweise unterstützt (vgl. YUEN et al., 2011). Erkenntnisse aus der Literatur deuten auch darauf hin, dass AR-Tools die Fähigkeiten und die Wahrnehmung der Nutzer durch eine potenziell nachhaltige Optimierung der Arbeitsvorgänge verbessern können. Sowohl forschungsinduzierte als auch industrielle Beispiele sind in Form von AR-basierten Anleitungen bzw. Instruktionen, Fehlerdiagnosen oder jobspezifischen Trainings im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen (vgl. FRAGA-LAMAS et al., 2018; FRIGO et al., 2016), Montageprozessen (vgl. HEGENBERG & SCHMIDT, 2021; LOCH et al., 2016; HOŘEJŠÍ, 2015; ONG et al., 2008), Wartungsarbeiten (vgl. LEE & AKIN, 2011; RIOS et al., 2011; DUNSTON & SHIN, 2009) oder Schweißarbeiten (vgl. PARK et al., 2007) zu finden. Insbesondere in Bezug auf die Forschung zum Einsatz von AR-Systemen für Montageanleitungen finden sich in der Literatur mehrere Anwendungsfälle, die in ONG et al. (2008) und FRIEDRICH (2002) zusammengefasst sind. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Art der Visualisierung stark davon

abhängt, wie komplex der Montageprozess ist. Außerdem sind neben der Relevanz von Montageabläufen auch die Abhängigkeiten der einzelnen Montageschritte untereinander bei der Erstellung der Instruktionen zu berücksichtigen.

Angesichts des Potenzials von CPPS, die Haptik und die Detailvariablen von Arbeitsprozessen zu erfassen, die wiederum durch AR-basierte Technologien visualisiert werden können, ist es denkbar, dass solche Systeme neue methodische Konzepte zur Erfassung und Bereitstellung von Wissen schaffen, einschließlich des in verkörpertem Handeln eingebetteten Wissens. Während in der Vergangenheit Informationen durch Tastatureingaben und Mausklicks erfolgten, setzen sich Cyber-Physische Systeme aktiv und in Echtzeit mit der realen Welt auseinander. Dieser Umstand erfordert ein neues Verständnis von „physischer“ Computerarbeit (vgl. WOLF, 2009).

FAKOURFAR et al. (2016) heben bspw. die Verwendung von Gesten im Verlauf der Interaktion mit einer AR-Technologie hervor. Sie stellen fest, dass eine entsprechende Interaktion die Zusammenarbeit erleichtert, indem sie eine gemeinsame Referenz ermöglicht und damit die Bedeutung der körperlichen und räumlichen Aspekte des menschlichen Handelns anerkennt. Dies unterstreicht die Bedeutung des verkörperten Handelns für den Austausch von Wissen bzw. Know-how. Trotz der Arbeit von TANG et al. (2007), welche die Rolle der Verkörperung in Bezug auf Gruppeneffekte unter Berücksichtigung gemischter Präsenz untersuchten, bestehen in der Literatur aber keine weiteren Anhaltspunkte für eine wissensbasierte Nutzung von AR-Systemen im Hinblick auf erfasste verkörperte Handlungen. Weiterhin werden in der Literatur Szenarien der asynchronen Zusammenarbeit nur bedingt beleuchtet (vgl. IRLITTI et al., 2017). Die bisherige Forschung in diesem Bereich erfolgte überwiegend technologieorientiert. Eine Untersuchung, inwieweit AR- und sensor-basierte Systeme in Form von CPPS den Wissens- und Erfahrungstransfer umfassend unterstützen können, indem sie das in verkörperten Handlungen eingebettete Wissen sammeln und kollaborativ unterstützen, ist bis dato nicht bekannt. Außerdem besteht ein Forschungsbedarf hinsichtlich nutzerzentrierter Designansätze im Rahmen sozio-technischer Kontexte zugunsten eines umfassenden Verständnisses der notwendigen Anforderungen des Systems.

Erstellung und Visualisierung AR-basierter Instruktionen

Arbeitsanweisungen und klassische Handbücher sind im Rahmen manueller industrieller Tätigkeiten weit verbreitet, da sie standardisiert werden können. Durch eine unhandliche Gestaltung wirken sich derartige Instruktionen zum einen jedoch negativ auf die tatsächlichen Arbeitsprozesse aus. Außerdem können sie das Auffinden relevanter Informationen erschweren (vgl. NORMAN, 1998). Zum anderen sind Handbücher über Arbeitspraktiken in der Regel veraltet, da sich diese Praktiken mit der Zeit und der Verfügbarkeit neuer Ressourcen weiterentwickeln (vgl. NOVICK &

WARD, 2006). Somit besteht zur Überwindung dieser Beschränkungen ein Bedarf an neuen Wegen zur Aufzeichnung und zur Archivierung und zum Transfer von Wissen, insbesondere in industriellen Kontexten (vgl. AGRAWALA et al., 2003; SCHNOTZ & BANNER, 2003). Die Gestaltung und Darstellung von arbeitsprozessrelevanten Informationen bzw. Lehrmaterialien kann durch innovative Computertechnologien umgesetzt werden, wie z. B. AR-basierte CPPS.

Mit Hilfe von AR können Anweisungen schneller visualisiert und ausgeführt werden als mit gewöhnlichen zweidimensionalen Monitoren oder konventionellen Systemen, die in Head-Mounted Displays visualisiert werden (vgl. HENDERSON & FEINER, 2011; BAIRD & BARFIELD, 1999). Die AR-Technologie kann sensorisch erfasste Informationen zu bestimmten Handlungen aufzeichnen, mit der realen Welt „vermischen“ und somit eine umfassende Darstellung des zu betrachtenden Prozesses vermitteln (vgl. PACAUX-LEMOINE et al., 2018). FIORENTINO et al. (2014) deuten bspw. darauf hin, dass derartige AR-basierte Anweisungen darin münden, dass ein signifikanter Einfluss auf die Gesamtausführungszeit von Wartungsaufgaben und auf die Anzahl der dabei begangenen Fehler generiert werden kann. AR-unterstützte CPPS sind also in der Lage, die Dokumentation des Wissens und den Transfer zwischen fachkundigen Akteuren zugunsten der Unterstützung von in verkörperten Handlungen eingebettetem Wissen zugunsten einer verbesserten Arbeitsleistung zu ermöglichen (vgl. DEY et al., 2018). Eine durch AR-Unterstützung induzierte Leistungssteigerung ist u. a. durch eine multimodale Feedbackstruktur, d. h. eine Kombination aus visuellem und auditivem bzw. taktilem Feedback, begründet (vgl. BURKE et al., 2006). TANG et al. (2003) weisen darüber hinaus nach, dass die Nutzung der AR-Technologie die kognitive Belastung verringern kann. Die digitale Technologie bietet ständige Echtzeit-Updates über den Arbeitsfortschritt (vgl. HERMSEN et al., 2016; GOOMAS, 2012), sodass ein effektives unmittelbares Feedback ermöglicht wird (vgl. GOOMAS, 2011) und die Reflexion in der Handlung selbst effektiver zu sein scheint als die Reflexion über die Handlung (vgl. DARBY, 2006). Außerdem ist durch die Anpassung der virtuellen Repräsentationen an die Realität eine räumliche Platzierung nicht erforderlich. Dadurch kann AR die Genauigkeit im Arbeitsprozess potenziell erhöhen und gleichzeitig die kognitive Belastung des Nutzers verringern (vgl. TANG et al., 2003). Zahlreiche Studien weisen allerdings auch auf die Grenzen respektive zu den beschriebenen Erkenntnissen widersprüchliche Ergebnisse in Bezug auf die Anwendung von Augmented Reality hin. KOSSLYN (2006) beschreibt bspw., dass hinsichtlich der Genauigkeit bis heute kein unbestreitbares Ergebnis über die Auswirkungen der AR-basierten Visualisierung auf die genaue Positionierung der visualisierten Elemente vorliegt. Außerdem wird die tatsächliche Reduzierung der Ausführungszeiten und der Fehler bei Nutzung von AR-Unterstützungssystemen für Montagearbeiten in Frage gestellt (vgl. DROUOT et

al., 2022; WERRLICH et al., 2019; FUNK et al., 2016). Die Erkenntnisse zeigen, dass AR-unterstützte Lernprozesse gegenüber konventionellen Instruktionen keine signifikanten Vorteile aufweisen, sowohl hinsichtlich der Anzahl der Fehler als auch in Bezug auf die Ausführungszeit und den Arbeitsaufwand. Ergebnisse aus früheren Studien deuten auf eine gleichmäßige Abflachung der Lernkurve nach der ersten Trainingsphase hin (vgl. WILSCHUT et al., 2019).

Die AR-Technologie kann erfahrene Bediener bei der Erstellung von Instruktionen bzw. Arbeitsanweisungen unterstützen, indem Montageschritte aufgezeichnet und im System kommentiert werden, sodass unerfahrene oder anzulernende Maschineneinrichter auf dieses Wissen zugreifen können. Ein Assistenzsystem stellt dem Nutzer respektive dem „Autor“ die erforderliche Montagestruktur und den jeweiligen Einbauort der Werkzeuge dar. Die eigentliche Erstellung von AR-basierten Inhalten kann jedoch komplex, teuer und zeitaufwändig sein (vgl. BHATTACHARYA & WINER, 2019). Neuere Untersuchungen zeigen, dass Hologramme in einer Umgebung mit komplexen Aufgaben für den Wissens- und Erfahrungsaustausch geeignet sind (vgl. KOSSLYN, 2006; SPEIER et al., 2003). Sie können die Position der darzustellenden Informationen und die Ausrichtung des angezeigten Objekts berücksichtigen (vgl. RZAYEV et al., 2018; NEWELL et al., 2014). Unabhängig von dem beschriebenen Potenzial, besteht eine große Herausforderung darin, den Nutzer im Rahmen seiner alltäglichen Arbeitsumgebung in die Lage zu versetzen, AR-Inhalte ohne wiederholte Unterbrechungen zu erstellen und ohne Beeinträchtigung der Arbeitsleistung zu teilen (vgl. NEBELING & SPEICHER, 2018; SPEIER et al., 1997). Intelligente Autorenumgebungen beinhalten neben der Generierung von virtuellen Inhalten auch Ontologien und Logiken, die eine sinnvolle Anleitung und Rückmeldung zur durchgeführten Aufgabe ermöglichen (vgl. WESTERFIELD et al., 2015). Insbesondere bei kollaborativen Prozessen ist neben der visuellen Darstellung auch eine intelligente Aufgabenverteilung erforderlich (vgl. HENDERSON & FEINER, 2011). Autorenumgebungen, die auf der Basis einer Desktop-Anwendung implementiert sind, werden in stationären Szenarien bevorzugt, da sie von den Nutzern als leistungsfähig wahrgenommen werden (vgl. GONZALEZ et al., 2019).

Grafische Informationen bieten im Vergleich zu rein textlichen Anweisungen einen Mehrwert. Konventionelle Ansätze sammeln bspw. in einer Wissensdatenbank über einen bestimmten Zeitraum bestehende Anleitungen, die anschließend mit einem GUI (Graphical User Interface)-Editor bzw. entsprechenden Autorenprogrammen bearbeitet und mithilfe von Objekterkennungsalgorithmen in einer AR- oder Mixed-Reality-Ansicht dargestellt werden (vgl. JO et al., 2014). Um die Autorenumgebung möglichst einfach und verständlich zu gestalten, werden z. B. 3D-Modellierungswerkzeuge herangezogen (vgl. SEICHTER et al., 2008; ZAUNER et al., 2003). Darüber hinaus

können sensorische Werte und komplexe Erkennungsalgorithmen genutzt werden, um AR-Anweisungen bei der Ausführung einer Aufgabe abzuleiten und im Detail manuell anzupassen (vgl. BLANDFORD et al., 2008). Video-Tutorials eignen sich, um Wissen im Rahmen der Bewältigung komplexer Aufgaben zu vermitteln (vgl. MICHAS & BERRY, 2000). Der Konsum derartiger Videosequenzen kann jedoch zeitaufwändig sein und nur einen sehr spezifischen Einblick bezogen auf die gesamte Aufgabe geben. Um dieser Problematik zu begegnen, legen CHI et al. (2012) nahe, Video-Tutorials mit „statischen“ bzw. bild- und textbasierten Instruktionen zu kombinieren. Ersteres kann ein beschleunigtes Lernen in den Anfangsphasen des Lernprozesses unterstützen, während Letzteres das Abrufen bereits erlernter Fähigkeiten zu einem späteren Zeitpunkt fördern kann (vgl. PALMITER et al., 1991).

Die Nutzung von sensorischen Informationen und die in Teilen automatisierte Erstellung von AR-Inhalten steht im Einklang mit einem CPPS-basierten Ansatz für den Wissens- und Erfahrungstransfer. CPPS haben ein großes Potenzial, die Vernetzung von Produktionsanlagen mit dem Produktdesign, Supply Chain Management und Qualitätssicherungsprozessen durch die Bereitstellung von Schnittstellen zur Produktionsanlage und die Erfassung von Maschinen- und Sensordaten sicherzustellen (vgl. WAGNER, 2018).

4.3 Modellbasiertes Design für den Wissenstransfer

Die Literatur zu Modellentwicklungen ist vielfältig. Sie reicht von einfachen Anwendungen (vgl. BENFORD et al., 1993) über die Entwicklung von Kommunikationsmodellen (vgl. DEMICHELLIS & GRASSO, 1994) bis hin zur Untersuchung des Spielraums für die Entwicklung generischer Modelle zur Unterstützung von Kollaboration und Koordination (vgl. MAINWARING & LEE, 2017). Nicht zuletzt wird auch die Unterstützung des Wissenstransfers bei kooperativer Arbeit thematisiert (vgl. DIVITINI et al., 1993). Modellbasiertes Design fußt insbesondere in den o. g. Themengebieten auf ethnographischen Erkenntnissen. Entsprechende Ansätze rücken dabei Prozesse (vgl. HOLTZBLATT & JONES, 2017), formale Artefakte bzw. Modelle (vgl. SALVADOR & MATEAS, 1997) oder grafische Darstellungen (vgl. DIGGINS & TOLMIE, 2003) in den Mittelpunkt. Eine Reihe von Ansätzen zielen auch auf die Modellierung von Wissenstransferprozessen ab, wie bspw. das beschriebene Spiral- oder SECI-Modell (vgl. NONAKA & TAKEUCHI, 1995) zur Modellierung der Beschaffung und Weitergabe von Wissen oder das Modell des „Knowledge Sharing“ von PEINL (2006), das ebenfalls den intraorganisationalen Wissensaustausch thematisiert. RAELIN (1997) erweitert diese Sichtweise auf das Lernen, indem er in Anlehnung an NONAKA & TAKEUCHI (1995)

zwischen individuellem und kollektivem Lernen unterscheidet. Beide Sichtweisen werden wiederum in explizite und implizite Anteile untergliedert, sodass sich der Lernprozess letztlich in theoretische und praktische Aspekte aufteilt.

Zur Gestaltung nutzerfreundlicher interaktiver Systeme werden insbesondere Aufgabenmodelle herangezogen (vgl. PATERNO, 2005). Traditionelle Modelle, insbesondere aus dem HCI-Bereich, sind vermehrt auf psychologische Prozesse und deren Darstellung in mentalen Modellen ausgerichtet (vgl. NORMAN, 1998). Ein mentales Modell stellt ein vereinfachtes Abbild der Realität dar, welches das handlungssteuernde und objektbezogene menschliche Verhalten auf verschiedenen, hierarchisch gegliederten Regulationsebenen steuert (vgl. u. a. GENTNER & STEVENS, 2014). Nach JOHNSON-LAIRD (1983) kann ein mentales Modell als „innere Repräsentation der externen Welt“ beschrieben werden. In Abhängigkeit der Persönlichkeitsausprägungen bildet jeder Mensch unterschiedliche homomorphe Modelle aus. In diesem Zusammenhang verhelfen Analogiebildungen, z. B. hinsichtlich bildlicher und sprachlicher Metaphern, dem Individuum, den kognitiven Aufwand und die Komplexität zu reduzieren. Demnach haben Menschen differente Herangehensweisen, um Probleme zu lösen bzw. Aufgaben zu bearbeiten. Derartige kognitive Aufgabenmodelle können auch für praxiszentrierte Aufgabenmodellierung auf Grundlage ethnographischer Daten genutzt werden, bspw. mithilfe der grafischen Notation des „ConcurTaskTree“ (CTT, vgl. PATERNO, 2005).

Der CTT stellt einen gut etablierten Ansatz für eine nutzerspezifische Aufgabenmodellierung dar, der auf der Beschreibung temporaler Beziehungen zwischen Aufgaben respektive Anwendungen beruht. Diese können durch eine von insgesamt vier möglichen Komponenten bzw. Aufgaben beschrieben werden (siehe Abb. 4.1): eine nutzerbezogene („User Task“), abstrakte („Abstract Task“), eine systembezogene („Application Task“) und eine interaktive Aufgabe („Interaction Task“). Durch den Abschluss einer Aufgabe wird eine Änderung des Systemzustands hervorgerufen. In Abbildung 4.2 sind sämtliche Operatoren für die temporalen Beziehungen zwischen den Aufgaben aufgeführt. Der CTT verhilft somit sowohl zu einer möglichst abstrakten Darstellung eines mentalen Modells als auch zu einer detaillierten Darlegung spezifischer Prozesselemente zugunsten der Ableitung nutzerzentrierter und struktureller Grundanforderungen einer Arbeitsaufgabe. Dabei offenbart er Prozessbereiche, innerhalb derer sich Nutzer wesentlich in ihrer Vorgehensweise und in der Wahl ihrer Prioritätsentscheidungen unterscheiden.

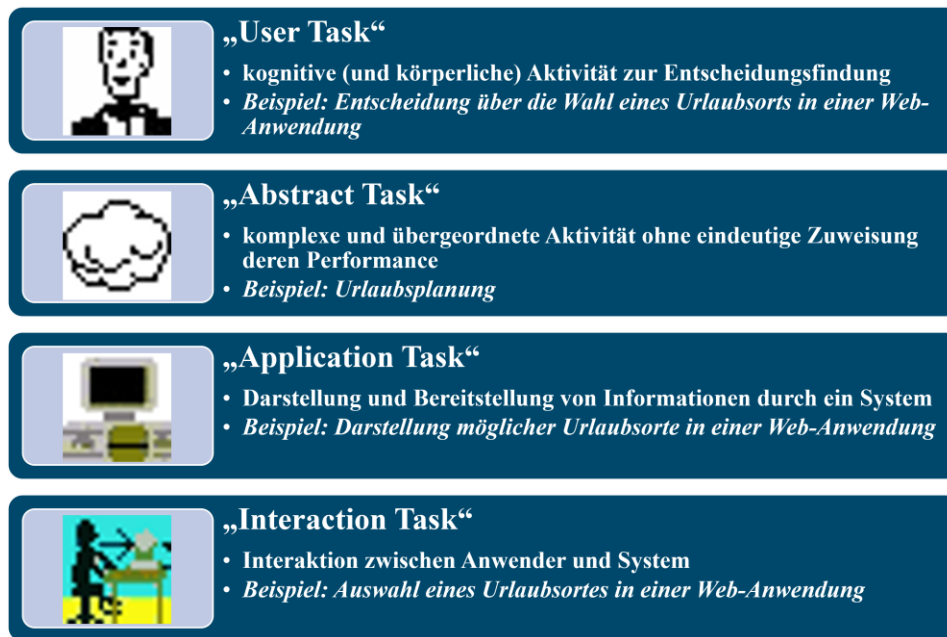


Abb. 4.1: Komponenten des CTT (am Beispiel der Festlegung eines Urlaubsortes, nach PATERNÒ, 2005)

Ein weiteres in diesen Zusammenhang einzuordnendes (lernbezogenes) Modell ist die „Cognitive Load Theory“ (CLT, vgl. SWELLER, 1994). Die Theorie befasst sich im Zuge der Modellierung und Gestaltung von Wissenssystemen im Wesentlichen mit dem Lernen im Rahmen komplexer Aufgaben. Die CLT geht davon aus, dass Lernende bei der Bearbeitung neuer Probleme nur über ein begrenztes Arbeitsgedächtnis verfügen, d. h. ein Kurzzeitgedächtnis zur Aufnahme von Informationen, die für die Ausführung einer aktuellen Aufgabe notwendig sind. Die Generierung neuer Schemata sowie die Automatisierung bestehender Schemata ermöglicht dem Akteur die Freisetzung seines Arbeitsgedächtnis. Das Arbeitsgedächtnis weist drei verschiedene Arten der Belastung auf. Die Menge der benötigten Informationen und die Interaktion mit ihnen wird als intrinsische Belastung (1) bezeichnet. Die extrinsische Last (2) wird durch Informationen auferlegt, welche weder die Ableitung neuer Schemata begünstigen noch die Automatisierung erleichtern. Die „Germane load“ (3) bezieht sich auf die Erstellung neuer oder automatisierter Schemata. Ein Schlüsselaspekt dieses Ansatzes ist, dass verschiedene Belastungsarten unterschiedliche Auswirkungen auf die Generierung eines Lernprozesses und die Weitergabe von Wissen haben. Dieser Sachverhalt wird im Folgenden insbesondere mit der Fragestellung in Verbindung gebracht, wie CPPS die Erfassung und Visualisierung von nicht-propositionalem Wissen bestmöglich unterstützen können.

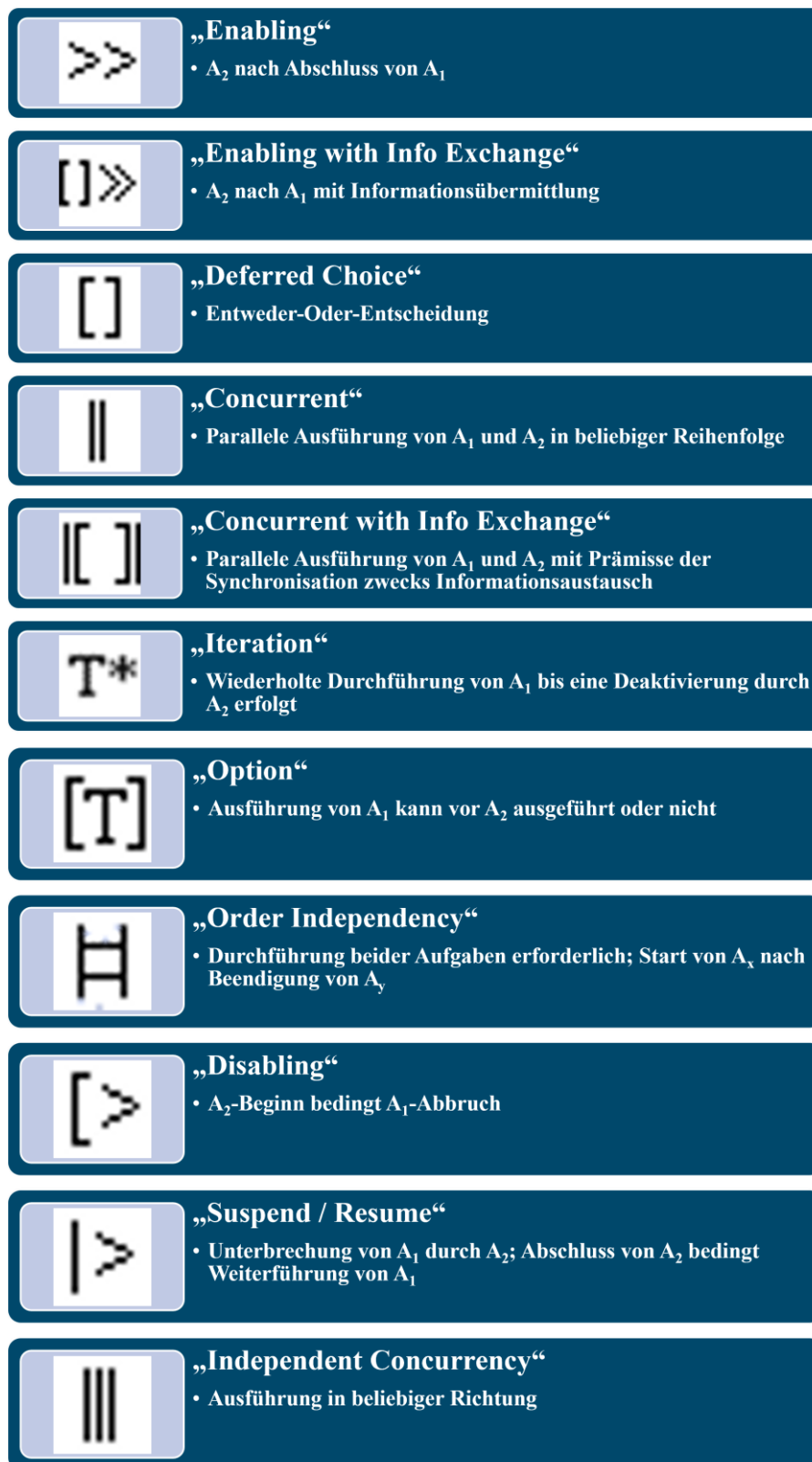


Abb. 4.2: Operatoren für zeitliche Relationen zwischen einzelnen Aufgaben bzw. Anwendungen (hier: A_n , nach PATERNO, 2005)

5 Ergonomie im industriellen (Rüst-)Kontext

Neben technischen Aspekten und Leistungsanforderungen an ein Arbeitssystem ist insbesondere der Mensch als wichtigster und wertvollster Produktionsfaktor in eine nutzerzentrierte und menschengerechte Arbeitsgestaltung einzubeziehen (vgl. STRASSER, 1986). In vielen Bereichen, wie speziell bei industriellen Rüstvorgängen an Biegemaschinen bei kleinen und mittelständischen Unternehmen, können Arbeitsaufgaben nicht vollumfänglich durch Maschinen ersetzt werden. In diesem Zusammenhang sind physische und psychische Beanspruchungen möglichst zu minimieren, um sowohl mit der „Ressource“ Mensch mit seinen individuellen Fähigkeiten und Fertigkeiten (vgl. KLUTH, 1996) als auch mit ökonomischen (Kosten-)Faktoren (vgl. RÜHMANN, 2004) sparsam und effizient umzugehen.

Die Vermeidung von arbeitsbedingten Erkrankungen und die Stärkung der Gesundheitsförderung des Arbeitnehmers bringen im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung verschiedene Herausforderungen und neue Belastungssituationen mit sich. Rüst- und Montagevorgänge weisen typischerweise körperliche Arbeitsaktivitäten auf. Kurze Taktzeiten und grundlegende Arbeitsinhalte mit z. T. sehr engen Prozessgrenzen können sich zusätzlich zu einseitigen körperlichen Belastungen auch psychisch auf die Arbeitspersonen auswirken. Letzteres kann u. a. durch den Umgang mit neuartigen Endgeräten, die als Hilfsmittel zur Arbeitsausführung Verwendung finden, ausgelöst werden (vgl. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014).

Um den beschriebenen Anforderungen bestmöglich gerecht zu werden, ist eine spezifische Untersuchung der Wirkungen von unmittelbaren und mittelbaren Arbeitstätigkeiten ein elementarer Bestandteil einer arbeitswissenschaftlichen Analyse. Nach LUCZAK & VOLPERT (1987) umfasst sie technische, organisatorische und soziale Bedingungen von Arbeitsprozessen. Objektive Belastungsgrößen und -faktoren wirken als Eingangsgrößen auf ein Arbeitssystem ein. Diese sind von der subjektiv empfundenen Beanspruchung, welche als Auswirkung der Eingangsgrößen auf den Menschen charakterisiert ist, zu unterscheiden (vgl. STRASSER, 1986). Das auf ROHMERT (1984), ROHMERT & RUTENFRANZ (1983) und ROHMERT et al. (1975) zurückzuführende Belastungs-Beanspruchungskonzept stellt einen theoretischen Ansatz dar, der menschenzentrierte Aspekte eines Arbeitssystems hinsichtlich ihrer Ursachen und Wirkungen miteinander verknüpft (vgl. SCHLICK et al., 2010). Die wechselseitigen Reaktionen des Menschen mit seiner Arbeit können somit untersucht werden (vgl. BUBB & SCHMIDTKE, 1993).

Objektive Bewertungsverfahren dienen in der Regel zur Analyse eines Arbeitsplatzes hinsichtlich seiner Risiken zu Gefährdungen des Menschen. Je nach Verfahrensmethode, d. h. messtech-

nische, objektive oder subjektive Verfahren, werden nicht nur das Ausmaß eines möglichen Risikos, sondern auch Vorschläge für Gegenmaßnahmen angeboten. Fragebögen mit Probanden stellen bspw. subjektive Methoden zur Ermittlung einer Belastung dar. Sie sind durch die individuelle und damit sehr unterschiedliche Wahrnehmung der Befragten fehleranfällig. Nichtsdestotrotz stellen sie in Kombination mit objektiven physikalischen Messverfahren ein wichtiges Instrument in der Forschung dar. Es existieren viele potenzielle Parameter, die eine Belastung für den Menschen darstellen und durch deren individuelle Eigenschaften in Beanspruchungen resultieren können. Geschlechterspezifische Unterschiede zeigen sich v. a. während der Ausführung muskulärer Arbeit. Männer weisen im Vergleich zu Frauen aufgrund ihrer größeren Muskelmasse eine in der Regel um 30 bis 50 % verringerte Aktivität für die gleiche Tätigkeit auf (vgl. u. a. STEINHILBER et al., 2013; HELD, 2014; HETTINGER, 1994), sodass sie für diese entsprechend weniger Kraft aufwenden müssen. Mit Ausnahme der Geschlechtertrennung werden in den objektiven Bewertungsverfahren eine große Anzahl an individuellen humanen Einflussparameter aufgrund ihrer Interdependenz und Korrelation und der damit einhergehenden Vielfalt an Parameterkombinationen unberücksichtigt gelassen oder zumindest weitestgehend verallgemeinert. Das dient zum einen der Praxistauglichkeit und zum anderen der möglichst großen Anwendbarkeit auf viele Individuen. Erweitert werden diese Einflussfaktoren durch die Arbeitsaufgabe und -durchführung. Dabei spielen bspw. die Körperhaltung, Bewegung, aufzubringende Kräfte, Handhabbarkeit des Arbeitsmittels und der zeitliche Faktor zur Arbeitsausführung eine Rolle. Neben der Gesamtdauer werden zwar auch die Wiederholungsrate respektive Repetitionen, Pausen und Erholzeiten sowie Umgebungsbedingungen betrachtet, d. h. Klima und Luftqualität, Beleuchtung, Akustik bzw. Schall sowie das soziale Arbeitsumfeld, allerdings nur mit einem eingeschränkten Detaillierungsgrad.

Um aufbauend auf den beschriebenen Ausführungen im Hinblick auf das vorliegende Anwendungsszenario sowohl die „technische“ Seite eines Arbeitsplatzes, die Eigengesetzlichkeiten der Arbeitsperson als auch die bestehenden interaktions-ergonomischen Gestaltungseigenschaften bestmöglich im Sinne einer menschengerechten Gestaltung der Arbeit evaluieren zu können, werden die nachfolgend beschriebenen Methoden und Verfahren erforderlich.

5.1 Das Belastungs-Beanspruchungskonzept

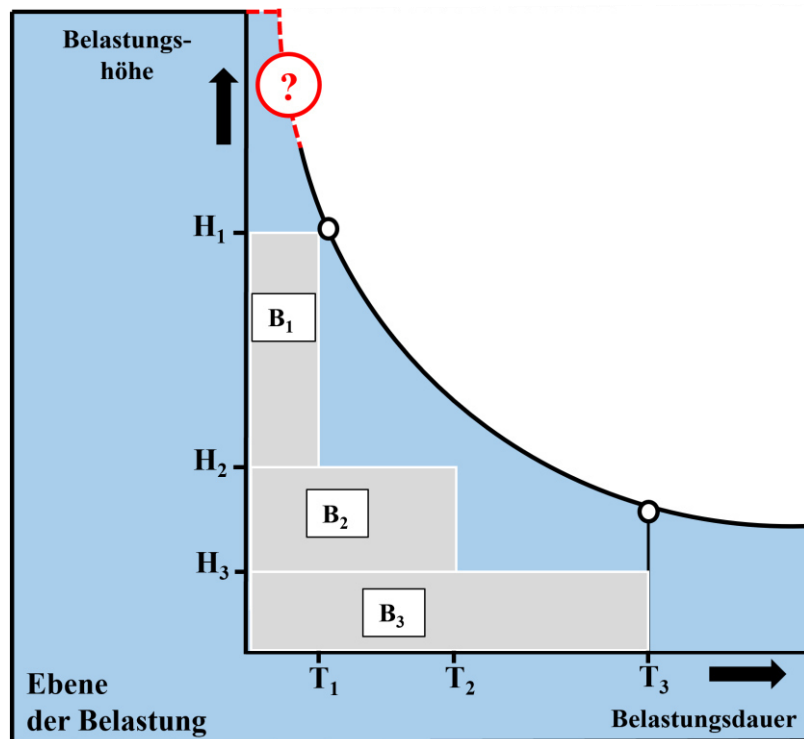
Eine der Hauptaufgaben der Arbeitswissenschaft ist die Untersuchung der Belastung und der daraus resultierenden Beanspruchung von Arbeitnehmern. Die Arbeitsphysiologie betrachtet die aus der Arbeit sowie dem Arbeitsumfeld entstehende körperliche Belastung. Entsprechend der individuellen Leistungsfähigkeit des Menschen folgt darauf eine unterschiedlich starke Reaktion

physiologischer Parameter (vgl. BULLINGER, 1994). Mit einem theoretischen Ansatz des Belastungs-Beanspruchungskonzepts können menschenbezogene Phänomene eines Arbeitssystems zunächst in einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang gebracht werden (vgl. ROHMERT, 1984; ROHMERT & RUTENFRANZ, 1983; ROHMERT et al., 1975). Daran schließt sich nach BUBB & SCHMIDTKE (1993) die Untersuchung der menschlichen Reaktionen im Wechselspiel mit seiner Arbeit an. Das primäre Ziel arbeitswissenschaftlicher bzw. ergonomischer Bestrebungen ist die Schaffung eines Arbeitsplatzes, der den Anforderungen für ein gesundes und effizientes Arbeiten weitgehend entspricht, um damit die Arbeit ausführbar, erträglich, zumutbar und zufriedenstellend zu gestalten (vgl. MARTIN, 1994; LAURIG, 1992; STRASSER, 1982).

Die Belastung umfasst wesentliche Einflüsse, die auf den Menschen im Zuge der Ausübung seiner Arbeit einwirken. Diese Einflüsse hängen mit dem spezifischen Aufgaben- oder Arbeitswiderstand, der Konfiguration der Arbeitsmittel sowie der Arbeitsumwelt zusammen. Bei der Ausführung der Arbeit muss die Arbeitsperson Widerstände überwinden, die aus der Arbeitskonfiguration entstehen. Während aus Arbeitsgegenständen bspw. Massen resultieren, die durch Muskelkraft bewegt werden müssen, wirken umweltbezogene physikalische Parameter, wie bspw. die Lufttemperatur, der Lichtstrom oder der Schall, die mittel- oder unmittelbar mit den Arbeitstätigkeiten zusammenhängen können, auf den Menschen belastend ein (vgl. u. a. IRLE, 1998).

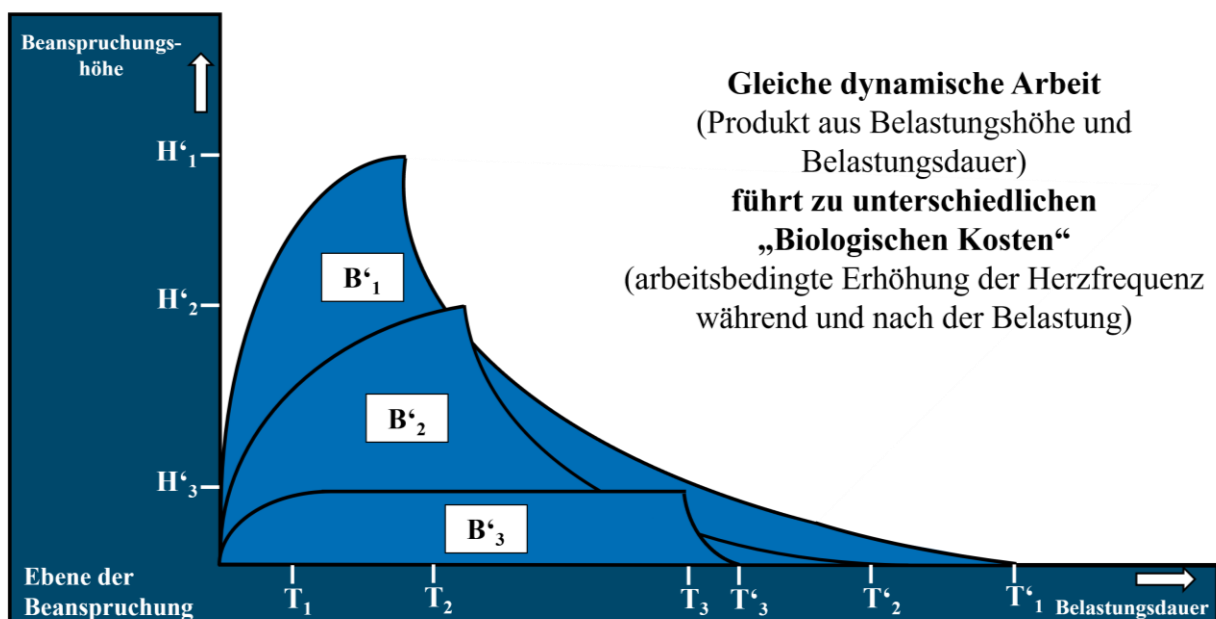
Belastungsgrößen G sind im Vergleich zu Belastungsfaktoren F quantitativ messbar und unterscheiden sich in den Dimensionen Belastungshöhe H und Belastungsdauer T . Charakteristische Belastungsgrößen resultieren aus der Arbeitsaufgabe bzw. durch körperliche Arbeit (z. B. Lastenhandhabung), der Interaktion mit Arbeitsmitteln (z. B. Kraftaufwand), der physikalischen, chemischen und biologischen Arbeitsumwelt (z. B. Lärm oder Klima) und der physischen Arbeitsorganisation (z. B. Taktzeit). Belastungen der sozialen, kulturellen und organisatorischen Arbeitsumwelt sowie besondere Ausführungsbedingungen, wie bspw. Arbeitszufriedenheit, Kompetenzbereiche oder Zeitdruck, werden als Belastungsfaktoren verstanden (vgl. u. a. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014; SCHLICK et al., 2010; HESSE, 1994). Die folgende Formel 5.1 und Abbildung 5.1 bilden die Funktion der Belastung B mathematisch oder grafisch ab.

$$B = f(H_G, H_F, T) \quad (5.1)$$



$$B_1 = H_1 \cdot T_1 = B_2 = H_2 \cdot T_2 = B_3 = H_3 \cdot T_3$$

Belastung = konstant



$$T'_1 > T'_2 > T'_3 \quad B'_1 > B'_2 > B'_3$$

Beanspruchung ≠ konstant

„Biologische Kosten“
sichtbar am Verlauf der Arbeitspulse

Abb. 5.1: Unterschiedliche „Biologische Kosten“, d. h. arbeitsbedingte Erhöhungen der Herzschlagfrequenz während und nach der Belastung, als Antwort auf gleiche dynamische Arbeit (Produkt $B = H \cdot T$ aus Belastungshöhe H und Belastungsdauer T , modifiziert nach STRASSER, 2007)

Neben der objektiven Betrachtung der Belastung dürfen die subjektiven Auswirkungen unterschiedlicher Arbeitspersonen nicht außer Acht gelassen werden (vgl. SCHNEIDER, 2009). ROHMERT & RUTENFRANZ (1975) bezeichnen diese Auswirkungen als Beanspruchung. Gleichzeitig geben sie an, inwiefern sich eine objektiv identische Belastung individuell auswirkt. Bei gleicher Belastungsdauer und Belastungshöhe führen die differente Leistungsfähigkeit der Menschen sowie der situative Umstand zu unterschiedlichen Beanspruchungen. Die individuelle Beanspruchung b_i ist eine Funktion (siehe Formel 5.2) der Belastung B und abhängig von den individuellen menschlichen Eigenschaften e , Fähigkeiten f_1 und Fertigkeiten f_2 (vgl. u. a. KIRCHNER, 1986).

$$b_i = f(B, e, f_1, f_2) \quad (5.2)$$

Bei Überschreiten der individuellen Leistungspotenziale bzw. liegt die Belastung über der jeweiligen Dauerleistungsgrenze, tritt Ermüdung auf (vgl. STRASSER, 1986). Diese bewirkt eine reversible Leistungs- oder Funktionsreduzierung sowie eine Beeinträchtigung der Organe (vgl. SCHMIDTKE, 1965). Die Kompensation von Ermüdungserscheinungen kann durch das Einhalten entsprechender Erholzeiten erreicht werden, um dem menschlichen Körper seinen natürlichen Ressourcenwiederaufbau zu gewährleisten (vgl. SCHLICK et al., 2010).

In Bezug auf Rüsttätigkeiten setzt sich die Höhe der Belastungsgrößen insbesondere aus der Schwere der körperlichen Arbeit zusammen. Der dynamische Prozess umfasst unterschiedliche Körperstellungen bzw. Rumpf- und Armhaltungen, Aktionskräfte, Lastenhandhabungen und repetitive Tätigkeiten, die sich z. B. durch die Erfassung muskulärer Aktivitäten und durch Verfahren zur ergonomischen Bewertung von Arbeit quantifizieren lassen. Die Arbeitsumgebung hat aufgrund der in einer Industriehalle, in der Rüstvorgänge an Biegemaschinen zur Herstellung von Kaltumformteilen durchgeführt werden, vorherrschenden neutralen Beleuchtungs-, Schall-, und Lärmsituation nur einen sehr geringfügigen Einfluss auf die physiologischen Kosten. Soziale und emotionale Faktoren, die sich aus Zeit- und Leistungsdruck, Störungen im Arbeitsablauf oder durch Konflikte mit Arbeitskollegen und Vorgesetzten ergeben, bestimmen zusammen mit den subjektiven Eindrücken der Arbeitsumwelt die Höhe der Belastungsfaktoren. Die Belastungsdauer ist mit der jeweiligen Arbeits- bzw. Expositionszeit gleichzusetzen. Neben den verschiedenen individuellen physischen (Alter, Größe, Gewicht, Geschlecht und Trainiertheit), psychischen (mentaler respektive geistiger Zustand, Motivation und Gestimmtheit), generellen (physische und psychische Gesundheit, tagesrhythmische Schwankungen und Ermüdung) und leistungsbezogenen (körperliche Verfassung und Kompetenzen) Eigenschaften der Maschineneinrichter tragen auch deren unterschiedlich ausgeprägter Erfahrungsschatz und differente Berufsausbildungen dazu bei,

dass spezifische Fähigkeiten und Fertigkeiten der Arbeitspersonen beobachtet werden können (vgl. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014).

5.2 Arbeitsphysiologische Beanspruchungsindikatoren und deren Ermittlung

Eine Analyse der Belastung stellt die elementare Grundlage für die Beurteilung der Beanspruchung dar, die durch eine Arbeitsplatzsituation hervorgerufen wurde. Physische und psychische Beanspruchungen treten in Form körperlicher und geistiger Arbeit im Hinblick auf die Charakteristik moderner Arbeitsplätze und hinsichtlich industrieller Rüstprozesse hauptsächlich kombiniert auf. Die Zusammensetzung dieser Kombinatorik hängt nach LAURIG (1992) insbesondere von der Art der Arbeit ab. Arbeit wird, global betrachtet, zwischen den beiden Typen energetische Arbeit und informative Arbeit unterschieden. In Abhängigkeit ihrer Funktionen gehen mechanische, motorische und reaktive Arbeiten sowie kombinatorische und kreative Arbeiten mit unterschiedlichen Beanspruchungsreaktionen involvierter Organe bzw. entsprechender Funktionen einher. Abbildung 5.2 kann die Systematik der Typen und Arten von Arbeit entnommen werden.

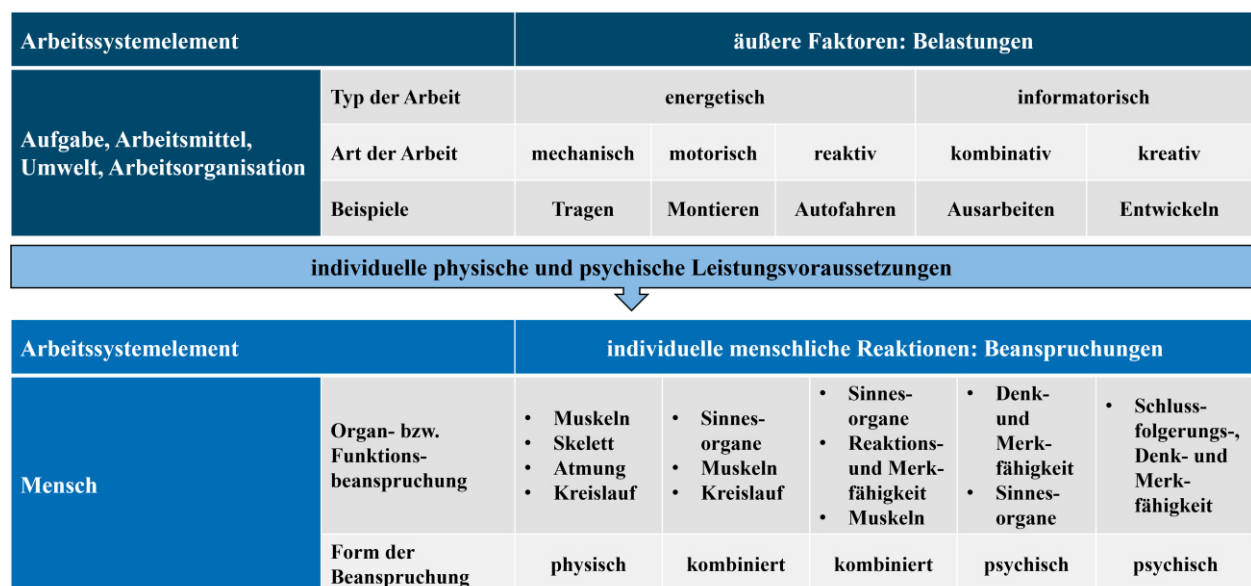


Abb. 5.2: Einteilung der Typen und Arten von Arbeit (modifiziert nach LAURIG, 1992)

Die Beanspruchungsanalyse einer Einzelperson ist möglich, lässt jedoch keine allgemeingültige Beurteilung der Arbeitsplatzsituation zu. Dieser Sachverhalt ist u. a. durch konstitutionelle bzw. alters- und geschlechtsspezifische Muskelkräfte, Leistungsdifferenzen, Motivationsaspekte, tagesrhythmische Schwankungen, Trainingszustand oder Ermüdungserscheinungen begründet, die sich unterschiedlich stark auf die Beanspruchung des Einzelnen auswirken. Um die grundlegenden Anforderungen der Validität und Reliabilität der Arbeits- und Messergebnisse gewährleisten zu kön-

nen, ist im Rahmen der Durchführung von Methoden der Beanspruchungsermittlung auf ausreichend große Probandenzahlen zurückzugreifen (vgl. STRASSER, 1982). Eine direkte Beanspruchungsermittlung ist nur bei rein statischen Belastungen durch die Ermittlung der abverlangten Kraft in Bezug auf die individuelle Maximalkraft möglich. Durch die in der heutigen Zeit vorherrschenden Mischformen geistiger und eher einseitig körperlich belastender Tätigkeiten ist eine direkte Quantifizierung der Beanspruchung nicht möglich. Um in diesem Zusammenhang dennoch eine Abschätzung der menschlichen Beanspruchung zu erlauben, muss auf geeignete Indikatoren zurückgegriffen werden: die Arbeitsleistung, die Leistung in einer Nebenaufgabe, subjektive Befragungen und physiologische Reaktionen. Die autarke Anwendung dieser Methoden kann eine ausreichende Grundlage für eine Beanspruchungsermittlung generieren. Bei kritischer Anwendung zusammenwirkender verschiedener Verfahren sind jedoch Aussagen über die Arbeitsbeanspruchung im Sinne einer „Engpassvorstellung“ möglich.

Sämtliche Größen, die am Menschen messbar sind, wurden auf Grundlage des heutigen Stands der Technik mit einer potenziellen Beanspruchungsindikation in Verbindung gebracht. Insgesamt kann zwischen globalen Indikatoren und peripher lokalen Indikatoren unterschieden werden. Während Erstere eine Aussage über die Gesamtbeanspruchung des menschlichen Organismus erlauben, können Letztere auf eine Beanspruchung eines bestimmten Organs bzw. einer Körperregion hindeuten. In der vorliegenden Arbeit werden weder zentralnervöse Indikatoren, wie bspw. das Elektroencephalogramm (EEG) zur Registrierung der bioelektrischen Aktivität des Gehirns, biomechanische Indikatoren, die durch die Endokrinologie unter Verwendung von Blut-, Speichel- oder Urinproben untersucht werden, noch vegetative Indikatoren, wie die Herzschlagfrequenz (HSF), granular betrachtet, sondern vielmehr muskel- und hautphysiologische Indikatoren evaluiert. Die Aufgabe eines Maschineneinrichters zur Umrüstung einer Biegemaschine, die durch den Einsatz einer AR-gestützten Datenbrille ergänzt wird, kann durch den Einsatz der peripher-physiologischen Elektromyographie (EMG), einer thermoregulatorischen Untersuchung mithilfe einer Wärmebildkamera sowie einer globalen Bewertung der Gesamtbeanspruchung durch objektive Bewertungsverfahren aus ergonomischen Gesichtspunkten bestmöglich analysiert werden. Insbesondere die elektrophysiologische Messmethode der EMG erfasst die bereits im Körper vorhandenen Signale, ohne dabei die Arbeitsausführung wesentlich zu beeinträchtigen oder die Arbeitsperson zu belästigen. Die Analyseergebnisse der relevanten Methoden und Verfahren werden durch subjektive Einschätzungen der Arbeitspersonen ergänzt.

5.2.1 *Elektromyographie*

Eine verantwortungsvolle menschenzentrierte Arbeitsplatz- und Arbeitsmittelgestaltung bzw. eine Beurteilung dessen kann nur auf Grundlage der Generierung objektiver Kriterien zur ergonomischen Beurteilung arbeitsplatzspezifischer Beanspruchungen erfolgen. Arbeitswissenschaftliche Untersuchungen beinhalten daher die Ermittlung „physiologischer Kosten“ der Arbeitstätigkeit. Das Ziel ergonomischer Untersuchungen liegt darin, mit den gewonnenen Informationen Rückschlüsse auf die individuelle muskuläre Beanspruchung und Ermüdung während einer Arbeitsaufgabe zu ziehen. Im Zuge dessen können dann bspw. Arbeitsplätze oder Arbeitsmittel hinsichtlich ihrer ergonomischen Qualität beurteilt werden, um so etwaige Handlungs- und Gestaltungsempfehlungen zur Verbesserung der gegenwärtigen Situation zu generieren. Des Weiteren ist auch eine vergleichende ergonomische Beurteilung verschiedener Arbeitsplätze oder Arbeitsmittel denkbar (vgl. STEINHILBER et al., 2013; BÖHLEMANN, 1997).

Industrielle Rüsttätigkeiten, die sich aus vorbereitenden und logistischen Arbeitsausführungen, Montagetätigkeiten und mit etwaigen Hilfsmitteln und Unterstützungssystem erforderlichen Interaktionen zusammensetzen, weisen sowohl statische Haltearbeit, u. a. durch die Aufrechterhaltung bestimmter Arbeitshaltungen, als auch prozessablaufbedingte dynamische Beanspruchungen der Nacken- und Schultermuskulatur auf. In Kombination der beschriebenen Arbeitsanteile kann eine Überlastung des gesamten neuromuskulären Systems durch Summationseffekte ausgelöst werden (vgl. KLUTH, 1996; EINARS, 1979).

Eine Engpassbetrachtung der Muskelbeanspruchung ist v. a. durch die Elektromyographie möglich. Bei der EMG wird grundsätzlich zwischen invasiven und nicht-invasiven Untersuchungsformen unterschieden (vgl. MÜHLEIB, 2003). Als peripher-lokale Untersuchungsmethode gibt die EMG insbesondere in Form der Oberflächen-Elektromyographie (OEMG) Aufschluss über die physische Analyse und Beurteilung von Arbeitsplätzen und Arbeitsmitteln. Die OEMG umfasst die Ableitung, Analyse und grafische Darstellung elektrischer Vorgänge in der Muskulatur. Ein Elektromyogramm beschreibt die Aufzeichnung elektrischer Potenzialänderungen, die nicht-invasiv mit Oberflächenelektroden von einem Muskel oder invasiv mit Nadel-Elektroden aus einem Muskel abgeleitet werden können (vgl. LAURIG, 1970). Nadel-Elektromyographie findet in der vorliegenden Arbeit sowie in heutigen arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen aufgrund ihres „blutigen“ bzw. schmerzhaften Einsatzes nur bedingt Verwendung, wenngleich sie tiefer liegende Muskeln erfassen kann. Die an der Hautoberfläche applizierten Elektroden leiten Summenaktionspotenziale ab, die bei einer Aktivierung des Muskels entstehen. Zwischen den Potenzialänderungen und dem Muskelzustand besteht Proportionalität, sodass ein höheres Aktionspotenzial eine stärkere Beanspruchung des Muskels respektive der Muskelgruppe bewirkt.

Die OEMG ist demnach kein direktes Messverfahren, um mechanische Kenngrößen, wie Muskelspannung, Muskelkontraktion oder Bewegungen, zu erfassen. Die beschriebenen Phänomene werden tatsächlich mit der Erfassung elektrischer Aktivität assoziiert (vgl. TASSINARY et al., 2007; BASMAJIAN & DE LUCA, 1985). Das technisch verstärkte und integrierte Myopotenzial wird auch als Elektromyographische Aktivität (EA) bezeichnet und dient als peripher-physiologischer Beanspruchungsindikator dazu, den Kontraktionsprozess der Muskeln zu spiegeln. Die elektrische Tätigkeit der Muskelzellen erzeugt Feldlinien, die sich bis an die Hautoberfläche ausbreiten und als Spannung messbar sind. Die (O)EMG-Aktivität ist als absolute Größe kaum interpretierbar. Aufgrund nicht kontrollierbarer (Stör-)Einflüsse wird die EA auf eine Bezugsgröße relativiert. Der Bezug der EA auf die maximal messbare Aktivität bzw. Maximalkontraktion des Muskels (Maximum Voluntary Contraction, MVC) ist dabei zur Beurteilung eines individuellen Leistungspotenzials hinsichtlich der lokalen Muskelbeanspruchung elementar (vgl. STEINHILBER et al, 2013).

Das OEMG-Rohsignal, das aus dem Elektromyogramm ersichtlich wird, stellt die zeitlich-räumliche Aufsummierung scheinbar zufälliger Überlagerungen und Aneinanderreihungen von motorischen Aktionspotenzialen dar (vgl. TASSINARY et al., 2007). Mit zunehmender Innervation der Muskeln steigt die Amplitude des Interferenzmusters von positiven und negativen Peaks (vgl. RÜDEL, 1985). Der Frequenzbereich des OEMG-Rohsignals, der zwischen wenigen und einigen Hundert Hertz (Hz) bei Muskeln mit großen motorischen Einheiten (z. B. m. biceps brachii) und bis zu über eintausend Hz bei Muskeln mit einer Vielzahl kleiner motorischer Einheiten (z. B. m. masseter) aufweist, ist vom Muskel und seiner Beanspruchung, Kraft und Ermüdung abhängig. Auf die messtechnische Verarbeitung des eingehenden Signals und im Zuge dessen auftretende Messfehler bzw. Störgrößen wird im Rahmen der methodischen Beschreibung der Forschungsarbeit eingegangen.

5.2.2 *Muskelphysiologie*

Zur Muskelphysiologie wurde in der Literatur bereits seit einigen Jahrzehnten ein breiter Wissensstand aufgebaut. Die folgenden Ausführungen stellen einen aus arbeitswissenschaftlicher Sicht erforderlichen inhaltlichen Auszug aus der Literatur dar, der im Detail den entsprechenden Quellen, u. a. ERNST (1989), RÜDEL (1985), EINARS (1979) und MEYER-WAARDEN (1975), entnommen werden kann.

Muskeln sind Zellgewebe, die als kontraktile Organe willentlich beeinflussbar und zur Kraftentwicklung befähigt sind. Ihrer aktiven Kontraktion steht eine passive Dehnung gegenüber. Skelettmuskel bestehen aus einer großen Anzahl parallel angeordneter Muskelzellen bzw. Muskelfa-

sern, die eine Länge von bis zu 30 cm aufweisen können. Muskelfasern entstehen durch die Verschmelzung mehrerer Zellen zu einer Einheit. Dadurch setzen sie sich aus mehreren Zellkernen zusammen. Muskelzellen enthalten neben Sarkoplasma (20-40 % der Zelle) auch Myofibrillen als kontraktile Eiweißstrukturen (60-80 % der Zelle). Die Myofibrillen können sich bei Erregung um 50 % ihrer Länge verkürzen. Die dabei auftretende Depolarisation der Zelle und die anschließende durch Ionenverschiebung stattfindende Repolarisation sind als Potenzialdifferenz im Bereich von einigen Milli-Volt (mV) messbar und dauern etwa 1 Milli-Sekunde (ms) an.

Der beschriebene elektrische Vorgang, auch als Muskelaktionspotenzial bezeichnet, wird durch einen Nervenimpuls ausgelöst und bewirkt die maximale Kontraktion der Muskelfasern nach dem „Alles-oder-Nichts“-Gesetz. Eine motorische Nervenzelle im Rückenmark (α -Motoneuron) innerviert eine Muskelzelle. Eine Nervenzelle versorgt über sich verzweigende Nervenfasern bzw. Motoneurone mehrere Muskelzellen. Sogenannte motorische Endplatten verbinden eine Nervenzelle mit den Muskelfasern, indem sie elektrische Impulse zugunsten einer Kontraktion des jeweiligen Muskels übertragen. Die beschriebenen Bestandteile – α -Motoneuron mitsamt der von der entsprechenden Nervenfasern innervierten Muskelfaser – bilden zusammen die kleinste funktionelle Einheit im Muskel: die motorische Einheit. Die Anzahl der Muskelfasern pro motorische Einheit variiert je nach Muskeltyp. Bei der feingliedrigen respektive feinmotorischen Augenmuskulatur versorgt ein Motoneuron bspw. ca. 20 Muskelzellen. Während bei den oberen Extremitäten von einem Motoneuron 200 bis 500 Muskelzellen auf einmal innerviert werden, sind bei der recht grobgliedrigen, kraftfordernden Muskulatur des Rumpfes und der Extremitäten bis zu 2.000 Muskelzellen auf ein Motoneuron „geschaltet“. Die resultierende Kontraktion bzw. eine Kraft-Weg-Steuerung des Gesamtmuskels kann nur durch eine Superposition von Einzelzuckungen der Zellen erreicht werden, d. h. durch eine räumliche und zeitliche Summation von Faserkontraktionen richtungsdifferenter Muskeln. Bei der räumlichen Summation können einerseits unterschiedlich viele motorische Einheiten und andererseits maximal zwei Drittel aller Muskelfasern eines Muskels bei einer Kontraktion aktiviert werden. Dabei ist die Zahl der erregten Muskelfasern der resultierenden Kraft proportional. Die zeitliche Summation setzt sich aus dem Muskelaktionspotenzial, das etwa 1 ms andauert, und einer nach einer Latenzzeit von wenigen ms erfolgenden Faserzuckung (10 bis 100 ms je nach Muskel) zusammen. Bei einer repetitiven Reizung ergibt sich damit eine zeitliche Überlagerung von Einzelzuckungen. Eine feinstufige Variation der Muskelspannung und Muskelverkürzung, d. h. letztlich der Muskelkraft, wird somit in Abhängigkeit der aktivierten motorischen Einheiten und der Frequenz der Aktionsimpulse bzw. der Anzahl der Erregungen pro Zeiteinheit erreicht.

Um eine Bewegung (im Gelenk) vollziehen zu können, bedarf es der Kontraktion mehrerer Muskeln bzw. mindestens zwei gegensätzlich arbeitender Muskeln. Der sogenannte Agonist und Antagonist, auch Spieler und Gegenspieler genannt, führen bei ihrer Kontraktion gegeneinander gerichtete Bewegungsrichtungen aus, damit sich der jeweilige Muskel beugen oder strecken kann. Verkürzt sich der Beugemuskel, wird der erschlaffte Streckmuskel gedehnt (und umgekehrt). Je mehr der Muskel gedehnt wird, desto stärker wird die sich vollziehende Bewegung abgebremst und dementsprechend gesteuert. Ohne diese Funktionsweise würde eine durch den Agonisten initiierte ungehemmte Kraftentwicklung erfolgen. Daraus folgt wiederum, dass sich Verletzungen aufgrund einer Grenzüberschreitung der anatomischen Gelenkbewegungen mit zunehmender Geschwindigkeit ergeben.

Für die Muskelkontraktion muss Energie bereitgestellt werden. Um Kräfte zu entwickeln und Arbeit leisten zu können, setzt ein Muskel chemische in mechanische bzw. potenzielle Energie um. Die Verbrennung energieliefernder Grundnährstoffe, wie Kohlenhydrate, Fette und Eiweiß, entwickelt im Muskel chemische Energie, indem Adenosintriphosphat (ATP) in Adenosindiphosphat (ADP) und Kreatinphosphat gespalten wird. ATP wird im Wesentlichen durch den Abbau respektive die biologische Oxidation von Nährstoffen gewonnen (aerobe bzw. unter Sauerstoff-Zufuhr erfolgende Glykolyse). Die Resynthese von ATP aus ADP und Kreatinphosphat und die anaerobe Glykolyse reichen aufgrund des geringen ATP-Vorrats im Muskel nicht aus, um die intramuskuläre ATP-Konzentration auch bei körperlicher Arbeit konstant zu halten. Damit die Energieversorgung des Muskels kontinuierlich sichergestellt werden kann, muss zum einen eine stetige Zufuhr und entsprechende Bereitstellung von ATP und des notwendigen Sauerstoffs gewährleistet werden. Ohne Sauerstoff-Zufuhr können die Muskeln nur kurzfristig arbeiten. Zum anderen müssen Stoffwechselprodukte, z. B. Kohlenstoffdioxid, und die entstandene Wärme abtransportiert werden. Diese Voraussetzungen werden durch den Blutkreislauf bzw. die Blutversorgung geschaffen.

Die Arbeit zur Kontraktion des Muskels kann isometrisch (durch Muskelanspannung ohne Wegänderung), isotonisch (durch Kontraktion unter konstanter Muskelspannung) oder auxotonisch (Mischform aus isometrischer und isotonischer Kontraktion als eine Bewegung gegen eine äußere Kraft) erfolgen. Weiterhin wird Muskelarbeit in statische „Halte“-Arbeit und dynamische Muskelarbeit unterteilt. Der dynamisch arbeitende Muskel bietet durch aufeinanderfolgende Kontraktions- und Erschlaffungsphasen eine optimale Durchblutung, da der Stoffwechsel aerob verläuft. Statische Arbeitsformen, die durch langandauernde isometrische Kontraktion der Muskeln charakterisiert sind, führen dazu, dass ein erhöhter innermuskulärer Innendruck die blutzuführenden Gefäße komprimiert. Während dynamische Muskelarbeit auch bei hohen Leistungen über eine

verhältnismäßig lange Zeit aufrechterhalten werden kann, bewirken statische Muskelbelastungen über 15 % der individuellen Maximalkraft eine verminderte Durchblutung mitsamt der mit dem anaeroben Stoffwechsel einhergehenden Mangelversorgung und -entsorgung des Muskels. Eine Kontraktionsstärke von 30 % der maximalen Muskelkraft bewirkt bereits eine fast vollständige Drosselung der Muskeldurchblutung. 50 % der Maximalkraft können nur etwa eine Minute aufrechterhalten werden (vgl. ROHMERT & LAURIG, 1993). Die Folge ist, dass Ermüdungserscheinungen, welche die Funktionsfähigkeit des Muskels beeinträchtigen und die Kontraktionskraft, Schnelligkeit und Ausdauer des Muskels reduzieren, in Abhängigkeit von der aufgebrachten Kraft entsprechend schnell auftreten können. Die verminderte Leistungsfähigkeit resultiert außerdem in einer eingeschränkten Feinmotorik und mentalen Leistungsbereitschaft.

5.2.3 *Physiologische Grundlagen zur Thermoregulation*

Zur Aufrechterhaltung seiner Lebensfunktionen benötigt der Mensch eine gleichbleibende Körperkerntemperatur von ca. $37 \pm 0,8$ °C. Daher muss seine Wärmebilanz ausgeglichen sein (vgl. HENSEL, 1973). In Abhängigkeit der körperlichen Tätigkeit bildet der Mensch unterschiedlich große Wärmemengen. Klimabedingt kann er darüber hinaus auch Wärme an seine Umgebung abgeben oder von außen aufnehmen. Bei schwerer körperlicher Arbeit kann die Wärme bspw. sowohl zum Körperkern als auch nach außen abgegeben werden, da eine Erwärmung der Muskulatur auf über 37 °C möglich ist.

Zur Regulierung der Produktion und Abgabe von Wärme greifen verschiedene Mechanismen. Bei der Wärmeabgabe nimmt das Blut durch das Temperaturgefälle im menschlichen Körper die im Körperinneren produzierte Wärme auf und leitet sie durch Konvektion zur Haut weiter. Dieser vom Körperkern zur Körperoberfläche stattfindende Wärmetransfer wird auch als innerer Wärmestrom bezeichnet (vgl. BEHRENDTS et al., 2010). Der äußere Wärmestrom beschreibt den Wärmeaustausch von der Körperoberfläche an die Umgebung. Dieser erfolgt sowohl über die Lunge bzw. Atemwege als auch und insbesondere über die Haut (vgl. BEHRENDTS et al., 2010; GEKLE & SINGER, 2010). Der Wärmetransport findet in Ruhe und bei einer Umgebungstemperatur von ca. 20 °C auf Basis der Wärmestrahlung (Radiation, zu ca. 70 %), der Wärmeleitung oder Wärmediffusion (Konduktion, zu ca. 10 %), der Verdunstung (Evaporation, zu ca. 20 %) und der Wärmeströmung (Konvektion) statt.

Zur Variierung der Wärmeabgabe verändert der Körper die Durchblutung peripherer Körperteile durch die Verengung (Vasokonstriktion) und Ausdehnung (Vasodilatation) von Blutgefäßen. In Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen verbessert (in warmem Klima) oder verschlechtert (in kaltem Klima) die Veränderung der peripheren Durchblutung in den Akren und Extremitäten

den Wärmedurchgang bzw. die Ankopplung des Körperinneren an die Umgebung (vgl. KAMPMANN, 2000). Akren und Extremitäten mit kleinem Durchmesser, wie z. B. die Nase, ermöglichen dadurch, dass sie bezogen auf ihr Volumen eine relativ größere Oberfläche als bspw. der Körperstamm aufweisen, eine höherer Wärmeabgabe. Je stärker die Muskeldurchblutung mit sinkendem Gefäßwiderstand und zunehmendem Herzzeitvolumen erfolgt, desto stärker verläuft der Wärmetransfer durch das konvektive Überbrücken von Teilen der Körperschale. Die Isolierung des Körperkerns nimmt dadurch ab.

Die Muskulatur wird in Körperruhe nur mit einem geringen Anteil an der gesamten vom Herzen geförderten Blutmenge versorgt. Die Temperatur ist im Körperkern um ca. 2 bis 4 °C höher als in der Körperperipherie, z. B. innerhalb des Skelettmuskels. Die Muskeldurchblutung nimmt dabei im Vergleich zu niedrigen (6 l/min) und hohen (13 l/min) Temperaturbelastungen bei neutralen Klimabedingungen um die Hälfte ab (vgl. ROWELL, 1986).

Rüstvorgänge an Biege- bzw. Umformmaschinen finden je nach Anwendungsszenario i. d. R. in neutralen klimatischen Umgebungen (17 bis 20 °C) statt. Der für den menschlichen Organismus unkritischen Umgebungstemperatur stehen je nach Ausprägung des Rüstprozesses (Komplexität der Rüstschritte, Maschinengröße etc.) unterschiedliche Arbeitsschweren gegenüber. Im Zuge der Ergebnisdarstellung dieser Arbeit wird auch auf Letzteres Bezug genommen. Der durch die fortschreitende Digitalisierung zunehmende Einsatz von mobilen optischen Anzeigen, wie bspw. von Head-Mounted Displays, führt außerdem dazu, dass Auflagepunkte der Datenbrille im Kopfbereich zu einer lokalen und punktuellen Wärmeentwicklung mitsamt etwaigen Durchblutungsstörungen führen können. Durch die dünne Hautschicht im Kopfbereich unterbinden bereits leichte Druckstellen die Durchblutung. Blutgefäße sind dann nicht mehr ausreichend durchlässig, um erforderliche Blutmengen zu transferieren. Je stärker dieser Effekt auftritt, ggf. begünstigt durch eine länger andauernde Nutzung des Mediums, desto größer sind die Beschwerden und Schmerzen seitens des Nutzers. Datenbrillen sollten daher zugunsten der Minimierung des Flächendrucks mit einer möglichst großflächigen Kopfauflage des Endgeräts sowie hinsichtlich des Materials mit geeigneten (nicht zu harten) Auflagepunkten ausgestattet sein.

Zur Beurteilung der Durchblutungssituation können Hautoberflächentemperaturen durch Infrarot-Thermografie mithilfe einer Wärmebildkamera gemessen werden. Oberhalb des absoluten Nullpunktes von -273,15 °C sendet jeder Körper elektromagnetische Strahlung aus. Die Intensität und spektrale Zusammensetzung der von einem Körper ausgesendeten Strahlung hängt eindeutig mit der Oberflächentemperatur dieses Körpers zusammen. Die Messung der Temperatur des Objekts kann durch die Ermittlung der Strahlungsintensität berührungslos bestimmt werden.

5.3 Arbeitspsychologische Beanspruchungsermittlung

Die Arbeits- und Organisationspsychologie zielt als Teilgebiet der Angewandten Psychologie auf die Erfassung von Ursachen ab, durch die das menschliche Verhalten in Organisationen bzw. Gruppen und der persönlichen Entwicklung eines Individuums im Zuge der Arbeitsausführung bestimmt werden (vgl. u. a. NERDINGER et al., 2008; FRIELING & SONNTAG, 1999; HACKER, 1994). Um eine gesundheitsgerechte und gleichzeitig gesundheitsfördernde sowie motivationale Gestaltung der Arbeit gewährleisten zu können, sind die auf den Menschen während der Arbeitsausführung einwirkenden Belastungen und Beanspruchungen zwingend zu bewerten.

Nach DIN EN ISO 10075-1 (2017) ist eine psychische Belastung die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die als externe Faktoren auf den Menschen psychisch einwirken. Diese Einflüsse entstammen dem Arbeitssystem respektive solchen Faktoren, welche die psychische Leistungsfähigkeit der Arbeitsperson beeinträchtigen. Zu diesen Faktoren zählen die Aufmerksamkeit, das Konzentrationsvermögen, der Intellekt und die Emotionen des Subjekts. Die Folgen daraus sind als psychische Beanspruchungen bzw. auf Grundlage des spezifischen Leistungsvermögens als individuelle und unmittelbare Auswirkung psychischer Belastung auf den Beschäftigten zu verstehen. Neben der mentalen Beanspruchung hat auch die emotionale Beanspruchung einen großen Anteil an der Gesamtbeanspruchung. Der Mensch wird durch informatorische Belastungen, bspw. im Rahmen der Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung bei Überwachungs- und Kontrolltätigkeiten, mental beansprucht (vgl. KANTOWITZ & CAMPBELL, 1996). Ausführungsbedingungen, wie bspw. Zeitdruck, Umgebungsbedingungen (Lärm, Klima oder Schall) oder zwischenmenschliche Beziehungen, beeinflussen das Subjekt auf emotionale Art und Weise. Aus den Beanspruchungsarten können sowohl positive Effekte, wie z. B. eine gesteigerte Arbeitsmotivation, als auch negative Begleiterscheinungen in Form affektiv bedingter Angstzustände, Langeweile oder Über- bzw. Unterforderung resultieren (vgl. LOCKE & LATHAM, 2002; MANZEY, 1998; SCHMIDTKE, 1993).

In der heutigen Arbeitswelt dominieren insbesondere informatorisch-mentale oder kognitive Tätigkeiten. Das Konzept der kognitiven Belastung beschreibt nach SWELLER & COOPER (1985), die Entstehung mentaler bzw. geistiger Belastung und die zugunsten eines optimalen Lernansatzes erforderliche Reduktion dieses Belastungsfaktors. Physische Messverfahren können in diesem Zusammenhang auftretende Beanspruchungen nur bedingt ermitteln, sodass subjektive Methoden zur Evaluierung von psychischen Zusammenhängen im Rahmen von Arbeitstätigkeiten herangezogen werden müssen. Die Güte der Verfahren zur Evaluierung der mentalen Beanspruchung hängt nach DIN EN ISO 10075-3 (2004) und PFENDLER et al. (1995) von der Objektivität des Messergebnis-

ses, der Validität und Reliabilität des Testverfahrens, der Differenzierbarkeit der Beanspruchungsfaktoren, der Logik der Aufgabenstellung, der Praktikabilität des Analyseverfahrens, einem möglichst breiten Anwendungs- bzw. Aufgabenspektrum sowie der Interferenzfreiheit ab. Schwierigkeiten bestehen hinsichtlich der Sprachgebundenheit und der inhaltlichen Eingrenzung von Beanspruchungs- bzw. Reaktionsindikatoren.

Neben psychophysischen Verfahren, Reiz-Reaktions-Modellen, handlungstheoretischen respektive behavioristischen Beanspruchungsmodellen oder tätigkeitstheoretischen Konzepten (vgl. ULICH, 2005; DIN EN ISO 10075-3, 2004; FRIELING & SONNTAG, 1999) können Arbeitsaufgaben durch Beobachtungen der Arbeitsperson anhand der Beurteilung der Arbeitsschwere oder durch Selbsteinschätzung bzw. subjektive Methoden bewertet werden (vgl. KLUTH, 1996). Insbesondere letztere kann durch eine Vielzahl an Methoden (vgl. u. a. LUCZAK, 1987; WICKENS & KRAMER, 1985; ROSCOE, 1978), bspw. mithilfe von Fragebögen, durch zugehörige Beurteilungsskalen und unter Berücksichtigung des Vorliegens einer tatsächlich vorhandenen Beanspruchung (vgl. JOHANNSEN et al., 1979) unterschiedliche Belastungs-Beanspruchungs-Zustände der Befragten einfach und zumindest annähernd abbilden. Subjektbezogene Beurteilungen bilden die Grundlage für eine externe Validität der Ergebnisse, indem ein Vergleich mit anderen Methoden oder Messverfahren angestellt werden kann (vgl. HART & STAVELAND, 1988). Die Anzahl möglicher Instrumente zur Evaluierung des subjektiven Beanspruchungserlebens ist immens (SCHÜTTE, 1986). Sie unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Dimensionsarten, der Anzahl der Dimensionen und in Bezug auf den jeweiligen Anwendungsbereich. In der vorliegenden Arbeit wurden Verfahren genutzt, die in der Praxis häufig angewendet werden, wie z. B. der NASA Task Load Index (NASA-TLX, vgl. HART & STAVELAND, 1988).

Die Elektromyographie kann theoretisch als psychophysiologische Beanspruchungsmessmethode herangezogen werden. Die Aktivität einer willkürlichen Muskelanspannung, die nicht für die Ausübung einer motorischen Tätigkeit erforderlich ist, spiegelt den allgemeinen, aktivierten Zustand des Nervensystems wider. Sofern der Mensch emotional und informatorisch angeregt wird, erhöht sich die Aktivität ruhender Muskeln (vgl. ROHMERT & LUCZAK, 1973). Allerdings kann eine autarke Betrachtung des EMG in Bezug auf informatorische Tätigkeiten nur unzureichend interpretiert werden. Vielmehr ist eine Korrelation der Muskelspannung und der informatorischen Tätigkeit bestenfalls in Verbindung mit einer elektroencephalographischen Aufzeichnung zu ermitteln. Daher wird ein entsprechender Zusammenhang von Arbeit mit mentaler Beanspruchung im Rahmen der Erfassung elektromyographischer Aktivitäten nicht betrachtet.

Die Analyse der Qualität der Arbeitsausführung bzw. der Leistungsmaße kann dazu beitragen, während der Tätigkeit empfundene Beanspruchungen zu erfassen. In Abhängigkeit der Aufgabencharakteristik kann eine abrupte Leistungsminderung, z. B. in Form einer erhöhten Fehlerhäufigkeit oder Durchführungszeit, ein Indikator für eine erhöhte Beanspruchung sein. Unsicherheiten bestehen hinsichtlich dessen, ob der „Performance“-Abfall das Resultat einer hohen Belastung oder einer verminderten Motivation war. Weiterhin kann eine Leistung auch bei zunehmender Belastung über einen längeren Zeitraum unverändert erbracht werden. Sowohl eine geringe als auch eine hohe Beanspruchung können eine geringe Leistung hervorrufen (Unter- und Überforderung), die sich durch die Differenz der zur Aufgabenerfüllung verfügbaren und der tatsächlich aufgewendeten Zeit ergibt. Die Nicht-Proportionalität des Ansatzes ist dadurch begründet, dass die Leistung bei unterfordernder Tätigkeit mit Zunahme der mentalen Beanspruchung ansteigt, während aus der Überforderung ein Leistungsabfall resultiert. Durch die Anpassung der Anstrengung an die Schwierigkeit der Aufgabe bleibt mentale Beanspruchung in einem „optimalen“ Zwischenbereich konstant, sodass ein entsprechender Anstieg keine Auswirkungen auf die Leistung zeigt (vgl. GOPHER & DONCHIN, 1986). Sofern für technische Systeme Leistungsmaße erfasst werden können, kann diese Art der Beanspruchungsermittlung herangezogen werden.

5.4 Verfahren zur ergonomischen Bewertung von Arbeit

Bewertungsverfahren für die physische Belastung zielen auf die Analyse vorhandener Belastungen am Arbeitsplatz ab. Sie orientieren sich an den gegebenen Arbeitsbedingungen und -tätigkeiten und sollen körperliche Belastungen und Risiken hinsichtlich arbeitsbezogener Gesundheitsgefährdungen standardisiert lokalisieren und bewerten. Obwohl nicht für jeden spezifischen Anwendungsfall ein allumfassendes Verfahren existiert, liegen für viele mögliche Anwendungsbereiche entsprechende Bewertungsverfahren zur Analyse und Bewertung körperlicher Belastungen vor (vgl. N.N., 2010). Normen enthalten z. B. auch weitere zur Risikobeurteilung der Körperhaltung (vgl. ISO 11226), der Aktionskräfte (vgl. ISO 11228-2), der Lastenhandhabung (vgl. ISO 11228-1) und der repetitiven Tätigkeiten (vgl. ISO 11228-3) zugehörige Hinweise (vgl. N.N., 2009). Die einschlägige Literatur und Normenwerke stützen sich zur praxisnahen Anwendung der Verfahren weitestgehend auf eine Einteilung in Abhängigkeit des Anwendungsfalls und der jeweiligen Zielgruppe. Die Vielzahl der Muskeln des menschlichen Körpers bedeuten überdies in Kombination mit unterschiedlichen Tätigkeiten und Arbeitshaltungen weitreichende Möglichkeiten von körperlichen Beeinflussungen durch die aufzubringenden Kräfte während der Arbeit. Eine eindeutige objektive Bewertung ist demnach nicht möglich, sodass für detaillierte Ergebnisse meist Experten- und Messverfahren von Nöten sind.

Die Belastungsarten, auf die sich sämtliche Bewertungsverfahren beziehen, teilen sich in manuelle Lastenhandhabung, durch die Tätigkeit erzwungene Körperhaltungen bzw. Zwangshaltungen, aufzubringende Aktionskräfte, repetitive Tätigkeiten und kombinierte Anteile auf (vgl. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014).

5.4.1 Manuelle Lastenhandhabung

Die manuelle Lastenhandhabung wird in §1 der Lastenhandhabungsverordnung (LasthandhabV, 2020) als „jedes Befördern oder Abstützen einer Last durch menschliche Kraft, unter anderem das Heben, Absetzen, Schieben, Ziehen, Tragen oder Bewegen einer Last“ beschrieben. Weitere Definitionen und zugehörige Grenzwerte werden durch die unterschiedlichen Verfahren vorgegeben. ELLEGAST (2005) unterstreicht, dass die durch vielfältige Risiken, die während der Arbeit für das Muskel-Skelett-System des Menschen bestehen, bedingte Komplexität eine entsprechende Bewertung der jeweiligen Belastungsart erschwert. Manuelle Lastenhandhabungen werden daher zugunsten einer vereinfachten Bewertung in die Kategorien „Heben, Halten, Tragen“ (HHT) und „Ziehen, Schieben“ (ZS) unterteilt, die wiederum in die Dauer bzw. Länge von Arbeitswegen untergliedert werden können.

5.4.2 Körperhaltung

Die Körperhaltungen, die beim Ausführen einer Tätigkeit eingenommen werden, beeinflussen sowohl das Arbeitsergebnis als auch den menschlichen Körper. Sie können aus rein physikalischen Gründen die Leistungsfähigkeit des Menschen mindern und seinen Körper erhöht belasten. Die Definitionen zu dieser Belastungsart variieren in den Arbeitsplatzbewertungsverfahren. Gemäß des Kooperationsprogramms zu normativem Management von Belastungen und Risiken körperlicher Arbeit entspricht die Belastungsart Körperhaltungen oder -bewegungen, die durch eine Tätigkeit bei geringem äußerem Kraftaufwand erzwungen werden (vgl. N.N., 2010). KUSSEROW (2005) definiert Haltungen als erzwungene Körperhaltungen oder Zwangshaltungen, die „bedingt durch die Tätigkeit, das Arbeitsmittel oder [die] Arbeitsmittelgestaltung über eine längere Zeit hinweg mit wenig Bewegungsmöglichkeiten eingenommen werden“. Ein Mangel an Bewegungsmöglichkeiten vermindert Bewegungssequenzen, in denen eine Entlastung der beanspruchten Muskulatur möglich ist. Diese statischen Körperhaltungen werden als solche kategorisiert, wenn sie länger als vier Sekunden eingenommen werden (DIN EN 1005-1, 2009). Während in vielen Screeningverfahren zur ergonomischen Bewertung von Arbeit lediglich das Vorkommen einer Haltung qualitativ bewertet wird, gilt in einigen Detailverfahren die quantitative Mindestdauer von vier Sekunden als Voraussetzung, um eine Haltung in die Bewertung miteinbeziehen zu können.

Dieser Umstand nimmt deutlichen Einfluss auf die Bewertung kurzzyklischer Bewegungsabläufe. Zur detaillierten Bewertung von Körperhaltungen wird die Belastungsart in „Sitzen“, „Stehen“, „Rumpfbeuge“, „Hocken, Knien, Liegen“ und „Arme über Schulterniveau“ unterteilt (vgl. DGUV Information 240-460, 2009). Sie empfiehlt für jeden einzelnen Aspekt mögliche Auswahlkriterien bzw. Verfahren zur Beurteilung derartiger Arbeitshaltungen.

5.4.3 *Aktionskräfte*

Körperkräfte stellen nach der DIN 33411-1 (1982) jene Kräfte dar, die durch die Aktivität von Muskeln innerhalb des Körpers wirken. Dahingegen wirken Aktionskräfte nach außen. Sie können sowohl aus Körper- als auch aus Massenkräften bzw. Trägheitskräften, die auf die Masse des Körpers wirken, sowie in Kombination entstehen (vgl. WAKULA et al., 2009). Da die manuelle Lastenhandhabung nur eine Spezifikation von Muskelarbeit darstellt, spielen die dort beschriebenen Umstände von statischer (Halte- oder Stützkräfte) und dynamischer (Eigenbewegungs- oder Manipulationskräfte) Muskelarbeit eine wesentliche Rolle zur Einordnung von Aktionskräften. Aufzubringende Aktionskräfte implizieren i. d. R. erhöhte Kraftanstrengungen und/oder Krafteinwirkungen für den ganzen Körper respektive das Hand-Arm-System (vgl. u. a. KUSSEROW, 2005), die nach der DGUV Information 240-460 (2009) in schwer zugängliche Arbeitsstellen (Steigen oder Klettern), Einsatz des Hand-Arm-Systems als Werkzeug (Klopfen, Hämmern, Drehen, Drücken) und Kraft- bzw. Druckeinwirkungen bei der Bedienung von Arbeitsmitteln unterteilt werden können.

5.4.4 *Repetitive Tätigkeiten*

Repetitive Tätigkeiten stellen in der Regel vor allem Belastungen für das Finger-Hand-Arm-System dar (vgl. N.N., 2010). Charakteristisch für diese Tätigkeiten ist ein sich wiederholender Arbeitszyklus (vgl. DIN EN 1005-5, 2007). Laut dem medizinischen Lexikon der beruflichen Belastungen und Gefährdungen weisen repetitive Tätigkeiten aus arbeitsmedizinischer Sicht einen relativ hohen Wiederholungsgrad auf (vgl. LANDAU & PRESSEL, 2009). Sofern die Zykluszeit maximal 30 Sekunden beträgt oder in mehr als der Hälfte der Zykluszeit Teiltätigkeiten wiederholt werden, wird eine Repetition entsprechend eingeordnet. Auch bei repetitiven Tätigkeiten werden Arbeitsdefinitionen in unterschiedlichen Detailgraden definiert. Die Leitmerkalmethode (LMM) „Manuelle Arbeitsprozesse“ gibt bspw. lediglich an, dass die manuellen Arbeitsprozesse von häufigen Wiederholungen gleicher oder ähnlicher Handgriffe geprägt sind. Das Detailverfahren „Ergonomic Assessment Worksheet“ (EAWS) weist hingegen auf konkrete Vorschläge zu Wiederholungsfrequenzen einzelner Körperregionen hin.

Durch die hohe Wiederholungsrate der Körperaktivitäten steigt das Risiko physischer Beeinträchtigungen. Häufig auftretende Krankheitsbilder werden bei entsprechenden Tätigkeiten als arbeitsbezogene Muskel-Skelett-Erkrankungen der oberen Extremität (work-related upper limb disorder) eingestuft (vgl. HOEHNE-HÜCKSTÄDT, 2005). Dazu zählt bspw. das Karpaltunnelsyndrom, bei dem der Mittelnerv im Handgelenk eingeklemmt wird.

5.4.5 *Auswahl eines Arbeitsplatzbewertungsverfahrens*

Trotz der beschriebenen einheitlichen Einteilung der Belastungsarten ist der Detailgrad der betrachteten Einflussparameter in den Verfahren unterschiedlich. Dieser Umstand liegt u. a. daran, dass Verfahren entweder für betriebliche Praktiker oder (arbeitswissenschaftliche) Experten konzipiert sind. Je feiner die Analyse der Belastung und Beanspruchung erfolgen soll, desto höher sind Komplexität und Umfang des Verfahrens – mitsamt der dafür notwendigen Schulung und Erfahrung. Dabei ist eine mehrstufige Prozessabfolge zu empfehlen. Aufbauend auf einem sogenannten „First Level“- oder (Grob-)Screening-Verfahren, das einen orientierenden Überblick über die Belastungssituation und mögliche Risiken gibt, sollte eine Detailanalyse respektive ein „Second Level“-Risikobewertungssystem bzw. -Screeningverfahren durchgeführt werden, um die zuvor bestimmten Ergebnisse in Form der aufgedeckten Gefahren zu verifizieren und zu spezifizieren. Der Abschlussbericht des Kooperationsprogramms zu normativem Management von Belastungen und Risiken körperlicher Arbeit fasst bestehende Verfahren zur Bewertung physischer Belastungsarten im Zuge der Arbeitsausführung in Abhängigkeit des Differenzierungsgrades zusammen (siehe Tab. 5.1).

Das Detail- bzw. Expertenverfahren EAWS lässt sich sowohl als First-Level- als auch als Second-Level-Screening-Verfahren anwenden. Während sich die Leitmerkmalmethoden auf manuelle Lastenhandhabungen und repetitive Tätigkeiten beschränken, umfasst das „Ergonomic Assessment Worksheet“ zusätzlich zu den genannten Aspekten im Zuge des Arbeitsprozesses zu beobachtende Körperhaltungen und Aktionskräfte (vgl. u. a. N.N., 2010; N.N., 2009). Aufgrund der detaillierteren Indexberechnungen und damit des höheren Detaillierungsgrades des EAWS- gegenüber des LMM-Tools, wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit in Ergänzung zu messtechnischen Verfahren zunächst die LMM und im Anschluss das EAWS-Verfahren herangezogen.

Tab. 5.1: Verfahrensauswahl zur Bewertung physischer Belastungen (modifiziert nach BGI/GUV-I 7011, 2013; N.N., 2007; ELLEGAST, 2005; KUSSEROW, 2005)

Beurteilungsebene	Manuelle Lastenhandhabung			Körperhaltung	Aktionskräfte	Repetitive Tätigkeiten
	HHT	ZS	kombiniert			
Grob-Screeningverfahren	Assembly Worksheet (AWS) light	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
	Benutzerspezifische Information (BGI) 504-46 / 7011	(X)	(X)	(X)		(X)
	DIN EN 1005-4			X		
	Risikobewertung nach Kilbom					X
	Schwellenwerttabelle	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
	Automotive Assembly Worksheet (AAWS)	X	X	X	X	
	AAWS Upper Limbs					X
	DIN EN 1005-2 und ISO 11228-1	X				
	DIN EN 1005-3 bzw. ISO/DIS 11228-2		X		X	
	Ergo-Test			X		
Screeningverfahren	Hand-Arm-Risk-Assessment Methode (HARM)					X
	IAD - Bewertung körperlicher Belastungen (BkB)	X	X	X	X	X
	LMM - HHT	X				
	LMM - MA					X
	LMM - ZS		X			
	New Production Worksheet (NPW)	X	X	X	X	X
	Occupational Risk Assessment (OCRA) of Repetitive Movements and Exertions of the Upper Limb					X
	Rapid Entire Body Assessment (REBA)			X		
	Rapid Upper Limb Assessment (RULA)			X		(X)
	Siemens-Verfahren und Derivate	(X)				X
Detail-/Expertenverfahren	Strain Index					X
	AAWS+	X	X	X	X	X
	Anforderungs- und Belastungsanalyse (ABA) Tech	X		X	X	X
	Design-Check (DC)			X	X	
	EAWS	X	X	X	X	X
	Hand Activity Level Threshold Values (HAL TLVs)					X
	Kraftbewertungsverfahren				X	
	National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)	X				
	OCRA-Verfahren					X
	OVAKO Working Posture Analysing System (OWAS)			X		
Messverfahren	Computer-unterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse (CUELA) von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems und weitere Messverfahren					kontinuierliche Messung von biomechanischen Belastungsgrößen und/oder physiologischen Messgrößen

Betriebliche Praktiker

Experten

Wissenschaftler

Gesetzgebungen und Verordnungen, wie das ArbSchG und die 9. Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (9. ProdSV) erfordern zugunsten einer umfassenden Gefährdungs- und Risikoanalyse in jedem Fall schnell einsetzbare und robuste Verfahren. Physische und psychische Mehraufwände der Arbeitspersonen sind stets unter Berücksichtigung ergonomischer Prinzipien auf ein mögliches Mindestmaß zu reduzieren (vgl. Richtlinie 2006/42/EG). Die Belastungsanalysen zeigen durch die Darstellung des Gefährdungs- und Risikopotenzials den ergonomischen Handlungsbedarf auf, der sich auf Grundlage gesetzlicher Vorgaben in möglichen Limitierungen und Engpässen widerspiegelt und Gestaltungsansätze aufzeigt.

5.5 Interaktions-ergonomische Gestaltungsanforderungen und Kompatibilität

Die Sicherstellung eines möglichst uneingeschränkten Material-, Kraft- und Informationsflusses bedarf der wechselseitigen Ausrichtung sämtlicher Komponenten von sozio-technischen Systemen der Arbeitswelt. Die Analyse und Gestaltung der Beziehungen zwischen dem Menschen und einem Arbeitsmittel zielt also auf eine maßliche bzw. anthropometrische Auslegung des Arbeitsplatzes sowie auf die interaktions-ergonomische Konzipierung des Informationsflusses ab. Der technologische Fortschritt bedingt, dass das Einleiten von Informationen in technischen Systemen eine entscheidende Rolle einnimmt. Die an den Menschen zurückgemeldeten Informationen, welche auf eine mittelbare oder unmittelbare Informationsausgabe des Arbeitsmittels folgen, werden entsprechend der Aufgabenstellung über unterschiedliche Sinneskanäle verarbeitet. Die übergeordnete Zielsetzung ist auf die Optimierung der Mensch-Arbeitsmittel-Schnittstelle zugunsten eines hohen Wirkungsgrades und einer hohen Zuverlässigkeit ausgerichtet. Dieses Ziel kann wiederum nur bei einem hohen Grad an Kompatibilität erreicht werden (vgl. STRASSER, 1993).

Abbildung 5.3 visualisiert nach STRASSER (1993) in einer übergeordneten Ebene die unterschiedlichen Kompatibilitätsarten in einem Mensch-Maschine-System. Die Reiz-Reiz-Kompatibilität beschreibt die optimale sensorische und motorische Anpassung von technischem Gerät an die menschlichen Eigenschaften in der sensorischen Nahtstelle eines Mensch-Maschine-Systems zur Minimierung des physiologischen Aufwands. Im vorliegenden Fall liegt sie genau dann vor, wenn bspw. natürliche Informationsdarstellungen, d. h. der Blick auf die Maschine, sowie künstliche Visualisierung durch Augmented Reality optimal aufeinander abgestimmt sind und sich dadurch die Wirklichkeit und das eingespielte künstliche Abbild weitestgehend entsprechen. Reaktions-Reaktions-Kompatibilität ist die Anpassung von technischem Gerät an die menschlichen Eigenschaften in der motorischen Nahtstelle eines Mensch-Maschine-Systems, sodass den anatomischen und physiologischen Eigengesetzlichkeiten des Hand-Arm-Systems Rechnung getragen

wird. Reiz-Reaktions-Kompatibilität liegt vor, wenn technisches Gerät an die menschlichen Eigenschaften eines Mensch-Maschine-Systems durch eine sinnfällige Zuordnung von Ursache und Wirkung angepasst wird. Aufgrund einer bestimmten Aktion treten gewohnheitsmäßig erwartbare Effekte auf, die der menschlichen Logik entsprechen und deren Zusammenhang eindeutig erkennbar ist.

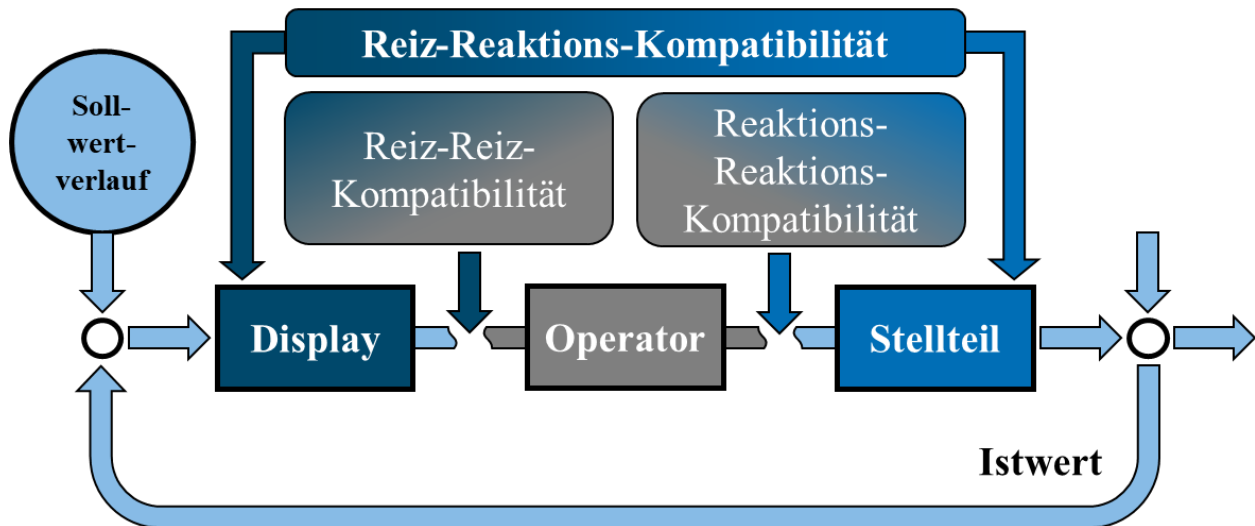


Abb. 5.3: Reiz-Reiz-, Reaktions-Reaktions- und Reiz-Reaktions-Kompatibilität in einem Mensch-Maschine System bei optimaler sensorischer und motorischer Anpassung von Gerät und menschlichen Eigenschaften sowie sinnfälliger Zuordnung von Ursache und Wirkung bzw. von Anzeige und Stellteilleffekt (modifiziert nach STRASSER, 1993)

5.5.1 Menschbezogene Aspekte

Informationen müssen zunächst taktil bzw. haptisch, optisch bzw. visuell und/oder akustisch bzw. auditiv aufgenommen werden. Wenn die verschiedenen Wahrnehmungssysteme gekoppelt angesteuert werden, ohne dabei eine Reizüberflutung zu generieren, wird die Informationsaufnahme erleichtert. Eine unmittelbare Informationsübertragung respektive Kommunikation ist aufgrund eines verminderten Dekodierungsaufwands seitens des Menschen anzustreben. Die über die aktivierten Sinneskanäle der Wahrnehmung aufgenommenen Reize werden in Abhängigkeit der Stärke, der Motivation und der kognitiven oder neurologischen Zustände des Menschen im Sinne der Aufgabenerfüllung verarbeitet. Dieser Prozess kann unbewusst oder bewusst unter Beachtung von Regeln, Normen und Vorschriften erfolgen. Im Anschluss an die Aufnahme und Verarbeitung der Informationen wird die als sinnvoll ausgewählte Reaktion in eine motorische Handlung in Form der Bewegung oberer (Finger oder Hände) bzw. unterer Extremitäten (Füße) oder durch Sprache umgesetzt (vgl. BOKRANZ & LANDAU, 1991).

Mögliche Fehler im Informationsfluss entstehen, wenn einerseits die Gestaltung eines technischen Hilfsmittels unzureichend erfolgt und andererseits die menschlichen Eigenschaften und Fähigkeiten nicht einem aufgabengerechten Informationsfluss entsprechen. Eine fehlerhafte Informationswahrnehmung entsteht durch eine ausbleibende Identifizierung einer Ergebnisabweichung von dem jeweiligen Reiz. Werden durch einen äußeren Reiz unpassende oder keine adäquaten mentalen Modelle angeregt, können Fehler in der Informationsverarbeitung entstehen. Schließlich können Fehler aus der Informationsumsetzung aufgrund einer ungeeigneten Auslegung der technischen Einrichtung (z. B. fehlende oder unzureichende haptische Unterscheidbarkeit der Stellteile) oder durch Unaufmerksamkeiten des Menschen (z. B. versehentliches Betätigen von Stellteilen) resultieren (vgl. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014).

RASMUSSEN (1986) vereint eine ursachenorientierte mit einer auftretens- bzw. verrichtungsorientierten Klassifizierung menschlicher Arbeitsfehler. Fehler können demnach durch mangelnde Übung auf einer Gewohnheitsebene, durch unzureichende Regelkenntnis oder auf einer Wissens-ebene durch eine begrenzte Rationalität und Irrtümer entstehen.

5.5.2 *Arbeitsmittelbezogene Aspekte*

Der Informationsverarbeitungsprozess eines Arbeitsmittels durchläuft drei Phasen (vgl. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014): Informationen werden bei ihrer Eingabe durch Betätigung von Stellteilen einer Maschine oder über komplexe Eingabesysteme, die bspw. auch durch eine gesten-gesteuerte Interaktion mit einer Datenbrille erfolgen könnten, übermittelt, anschließend verarbeitet und schließlich über Anzeigen ausgegeben.

Bei Arbeitsmitteln wird zwischen einer Hand- und einer Arbeitsseite unterschieden. Während die Anforderungen der Arbeitsseite, wie z. B. Kraftrichtung, Sicherheit oder Genauigkeit, die Grundlage für die Gestaltung bilden, ist für eine ergonomische Betrachtung die Handseite als Schnittstelle zum Menschen von entscheidender Bedeutung, bspw. hinsichtlich der feinanalytischen Greifart, Kopplungsart, Handhaltung oder Betätigungsart. Die Interaktion mit AR-basierten HMDs kann berührungslos und gesten-gesteuert erfolgen. Eine Betrachtung der Kopplungsart sowie der Greifart ist damit obsolet. Die zur Interaktion erforderliche Handhaltung variiert je nach Anforderungen der Datenbrille.

Mithilfe von Anzeigen können Informationen dargestellt werden, die unterscheidbare Sachverhalte angeben (vgl. DIN EN 894-2, 2008). Ihre Ausprägung hängt davon ab, über welche Sinneskanäle, d. h. optischer, akustischer oder taktile Sinneskanal, die Informationen zurückgemeldet

werden sollen. In Bezug auf AR-unterstützte HMD ist dabei insbesondere die optische Komponente von Bedeutung. Visuelle Informationen, die entweder autark generiert oder über unterschiedliche Funktechniken von einem Computer übertragen werden, werden auf einen augennahen Bildschirm oder direkt auf die Netzhaut projiziert. Die Informationen verbleiben im Sichtfeld des Nutzers, wodurch ein ständiges Interagieren sowie eine Überlagerung von Messgrößen und Programmschritten möglich wird. Je nach Anwendungsszenario und Endgerät erlaubt die technische Infrastruktur funktionale Ergänzungen bzw. Anbindungen an weitere Schnittstellen, z. B. Maschinendaten in Echtzeit.

Zur Gestaltung von Informationen mit einer stark ausgeprägten Reiz-Reiz-Kompatibilität müssen wesentliche hardware- sowie software-ergonomische Gestaltungsregeln beachtet und angewendet werden, um inkompatible Darstellungen und dadurch ausgelöste Fehlbedienungen, Performance-Verluste und physische sowie psychische Beanspruchungen auf ein Minimum zu reduzieren (vgl. COMETTI et al., 2018).

Grundsätzlich sollten Gestaltungsgrundsätze zur Entwicklung eines nutzergerechten Produktes nach interaktions-ergonomischen Prinzipien ausgerichtet werden. Das Usability-Engineering beruht auf dem in der DIN EN ISO 9241-210 (2020) beschriebenen Vorgehensmodell zur Planung menschenzentrierter Gestaltungsaktivitäten. Zunächst soll der Nutzungskontext analysiert werden, um anschließend Nutzeranforderungen festlegen und Gestaltungslösungen ableiten zu können. Diese werden einem Usability-„Testing“ bzw. einer heuristischen Evaluation unterzogen und entsprechend bewertet (vgl. SCHMAUDER & SPANNER-ULMER, 2014).

Hardware-ergonomische Gestaltungsprinzipien

Kompatibilität basiert im Sinne habitueller Stereotypen auf der elementaren Erwartung des Nutzers und auf der Stetigkeit bereits erlernter Merkmale hinsichtlich der Beziehung zwischen Anzeige und Wirklichkeit. Eine kompatible Anzeige liegt vor, wenn der Dekodierungsaufwand bei der Informationsverarbeitung durch eine entsprechende Gestaltung gering ist. Informationen müssen sichtbar bzw. gut ablesbar und ohne optische Ablenkungen dargestellt werden. Die Funktion der Stellteile sollte ebenfalls erkennbar sein. Neben der Betätigbarkeit, d. h. einer intuitiven Funktionssteuerung, sind auch Gestaltgesetze hinsichtlich einer Gruppierung von Informationsgebern möglichst nach Homogenitätsmerkmalen zu beachten. Diese Gesetze umfassen eine funktionelle und räumliche Anordnung nach Ähnlichkeitskriterien, eine Klarheit der Funktionsverbindungen sowie eine gute Gestalt. Die Gestaltungsregel „Kodierung“ beinhaltet die Zuordnung einer eindeutigen Kennzeichnung zu jeder Funktion. Zur Optimierung der visuellen und haptischen Erkenn- und Unterscheidbarkeit der Anzeigen und Stellteile werden Kodierungen herangezogen, wie

z. B. Farben, Formen, Größen, Positionen oder Piktogramme bzw. Symbole. Um den beabsichtigten Nutzen einer sicheren und unmittelbaren Identifizierung von Kodierungen sicherzustellen, sollten diese einheitlich verwendet werden. Eine farbliche Kodierung wird häufig über die Verwendung von Ampelfarben (grün: Sicherheit; gelb: Vorsicht oder Achtung; rot: Gefahr) generiert. Während Formen intuitives Handeln ermöglichen können, kann ein subjektives Rangverständnis der Größe von Bedienteilen unterschiedlicher Hersteller die Weitergabe kodierter Informationen (negativ) beeinflussen. Mithilfe von Kodierungen können außerdem Funktion, Zustand oder Wirkung von Stellteilen kodiert werden. Eine Funktionskodierung impliziert die mit dem Stellteil zu bedienende Funktion. Der Zustand einer Funktion wird über eine geeignete Anzeige übertragen. Bei der Wirkungskodierung wird der Nutzer über die Auswirkungen der Betätigung eines Stellteils informiert.

Software-ergonomische Gestaltungsprinzipien

Ziel der Software-Ergonomie ist die Anpassung der Software bzw. der User-Interfaces sowohl an physische und psychische Eigenschaften als auch an Kenntnisse und Gewohnheiten des Nutzers (vgl. DGUV Information 215-450, 2021). Die Darstellung von Bild und Text soll hierbei den Bedürfnissen des Nutzers angepasst sein, um eine beanspruchungsminimale und effiziente Interaktion zu ermöglichen (vgl. HEEG, 1988; HACKER, 1987). Bei der Gestaltung der Software soll also ein hohes Maß an Usability gewährleistet sein (vgl. DIN EN ISO 9241-210, 2020). Eine Vielzahl an technisch realisierbaren Programmkapazitäten ist zwar möglich, aber nicht immer sinnvoll. Ein „Information Overload“ ist in jedem Fall zu vermeiden.

Ärger, Frustration, Fehler und Zeitverlust sind neben physiologischen Kosten, wie Kopfschmerzen oder vorzeitiger Ermüdung, Folgen einer nicht ergonomisch gestalteten Software (vgl. NAVAS, 2015). Das menschliche Verarbeitungsvermögen von Informationen und Farben sowie das Kurzzeit- und Arbeitszeit-Gedächtnis nehmen bei der Gestaltung der Software eine sehr wichtige Rolle ein. Die Wahrnehmung und das Auffinden von Informationen sind genauso zu berücksichtigen wie das Verständnis von Begriffen und Kürzeln, die Beibehaltung von Icons und Symbolen, die Erwartung von bestimmten Funktionalitäten sowie die Gewöhnung an die Anwendung (vgl. BALZERT, 1987). Das Normenwerk DIN EN ISO 9241-110 (2020) sowie die DGUV Information 215-450 (2021) bauen auf diesen Aspekten auf und geben für die Ergonomie der Mensch-System-Interaktion wesentliche, nachfolgend aufgeführte Grundsätze zur Dialoggestaltung vor, um den Software-Entwicklern und -Anwendern eine möglichst benutzerfreundliche und gebrauchstaugliche Konzeption der Interfaces ermöglichen zu können:

- **Aufgabenangemessenheit:** Unterstützung des Nutzers zur effektiven und effizienten Erledigung seiner Arbeitsaufgabe.
- **Selbstbeschreibungsfähigkeit:** Angebot angemessener Informationen zur Offenlegung der Systemfähigkeiten und Nutzungsmöglichkeiten.
- **Erwartungskonformität:** Erwartungskonformer Dialog durch vorhersehbares Nutzerverhalten des Nutzungskontextes sowie durch allgemein anerkannte Konventionen.
- **Lernförderlichkeit bzw. Erlernbarkeit:** Unterstützung bei der Entdeckung von Fähigkeiten und deren Verwendung, Explorieren („Ausprobieren“) des interaktiven Systems und Lernunterstützung.
- **Steuerbarkeit:** Kontrolle über Benutzungsschnittstelle sowie die Interaktion inklusive der Geschwindigkeit, Abfolge und Individualisierung der Benutzer-System-Interaktion.
- **Robustheit gegen Benutzungsfehler:** Visualisierung von Fehlermeldungen und Anleitungen zur Fehlerbehebung, sodass eine unmittelbare Fehlerkorrektur erfolgen kann.
- **Benutzerbindung:** Darstellung von Funktionen und Informationen auf einladende und motivierende Weise zugunsten einer kontinuierlichen Systeminteraktion.

DIN EN ISO 9241-112 (2017) führt ergänzende Grundsätze auf, die allgemeine Gebrauchstauglichkeitsprobleme behandeln, welche während der Entwicklung von Benutzungsschnittstellen bei der Informationsdarstellung entstehen. Um den Usability-Anforderungen gerecht zu werden, sind dabei die Zielkriterien „Effektivität“, „Effizienz“ und „Zufriedenstellung“ zu erfüllen. Zu den genannten Grundsätzen zählen Entdeckbarkeit, Ablenkungsfreiheit, Unterscheidbarkeit, eindeutige Interpretierbarkeit, Kompaktheit und Konsistenz.

5.6 Ergonomische und praxisbezogene Studien zum Einsatz AR-basierter Datenbrillen

In den letzten Jahren wurde eine große Anzahl an Studien zur Nutzung AR-gestützter Datenbrillen in Bezug auf unterschiedliche Forschungsschwerpunkte durchgeführt, v. a. hinsichtlich der Arbeitseffizienz und in Bezug auf potenzielle Wissenstransferansätze. Ergonomische Untersuchungen von potenziellen Auswirkungen auf den Menschen in Folge des Umgangs mit AR-basierten HMDs wurde allerdings, insbesondere im industriellen Kontext und in Bezug auf Anwendungen, die ein erhöhtes Maß an Genauigkeit erfordern, nur in geringem Umfang betrachtet (vgl. D'AMATO, 2022). Einerseits konnten in einschlägigen Studien physische Beanspruchungen insbesondere im Schultern-Nacken-Bereich des Anwenders und andererseits psychische bzw. kognitive Beanspruchungen festgestellt werden. Entsprechend relevante Studien, die zumeist eine quantitative Forschungsmethodik im Rahmen von Laborversuchen verfolgten, werden nachfolgend beispielhaft näher beschrieben.

5.6.1 *Physische Einflussfaktoren*

THEIS et al. (2016) führten eine Laborstudie durch, im Zuge derer die physische Beanspruchung von insgesamt 60 teilnehmenden Probanden untersucht wurde. Die Arbeitsaufgabe beinhaltete die Montage bzw. Demontage eines Motors. Dabei nutzten die Teilnehmenden, die in eine junge (18 bis 39 Jahre) und eine alte Altersgruppe (40 bis 60 Jahre) eingeteilt wurden, entweder ein HMD (Lite-Eye LE-750 A) mit den Augmented-Reality-Modi „See-Through“ und „Look-Around“ oder einen klassischen (19-Zoll-)Flachbildschirm. Die muskuläre Beanspruchung wurde während der Montage im Hals-Nacken-Schulter-Bereich mittels der Oberflächen-Elektromyographie erfasst. Neben dem Trapez-Muskel und dem m. sternocleidomastoideus wurde auch der m. splenius capitis evaluiert. Die Forschenden gingen in ihren Hypothesen davon aus, dass sich die normalisierte Muskelaktivität auf der rechten und linken Seite bei der Nutzung der unterschiedlichen Displaytypen altersspezifisch unterscheidet. Neben der Muskelaktivität wurde auch die Muskelermüdung bei vergleichbarer Bewegung untersucht. Dazu führte jeder Teilnehmende am Ende jedes Arbeitsschrittes für jeden Muskel eine einheitliche und damit vergleichbare, aufgabenunabhängige Übung durch. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss des HMD im langzeitigen Einsatz keine signifikante Auswirkung auf die Muskelaktivität des m. splenius capitis und m. trapezius pars descendens hatte.

FRIEMERT et al. (2016) untersuchten die Änderung der körperlichen Belastung bei Benutzung der Datenbrille „Vuzix M300“ während der Ausführung von Kommissioniertätigkeiten. Die Teilnehmenden der Laborstudie erhielten PC-basierte und Datenbrillen-gestützte Kommissionierungsinstruktionen. Während die Messung der Muskelaktivität mittels EMG erfolgte, wurde zusätzlich dazu auch das Messsystem „CUELA“ (Computer-Unterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse) zur Evaluierung von Belastungen des Muskel-Skelet-Systems eingeführt. Die Auswertung der Daten der 29 Probanden lieferte zeitliche Gelenkwinkelkurven, die erkennbare Unterschiede zwischen den zwei Durchläufen (Datenbrille vs. PC-Monitor) zeigten, insbesondere im Nacken- und Kopfbereich (vgl. FRIEMERT et al., 2020). Die Ergebnisse der Pilotstudie führten zu der Hypothese, dass sich Datenbrillen zumindest teilweise positiv auf die Körperhaltung bei der Kommissionierung auswirken, wenn sie als aktives Biofeedback-Informationssystem genutzt werden. Diese Hypothese wurde jedoch noch nicht in einer Laborstudie mit einer größeren Probandenanzahl untersucht. Das Forschungsteam weist zudem darauf hin, dass es sich hierbei um Ergebnisse einer Studie handelt, die durchgeführt wurde, um die ersten Eindrücke und Parameter der Akzeptanz der Verwendung von Datenbrillen in einer simulierten Kommissionierungsaufgabe zu untersuchen. Die meisten Ergebnisse seien aufgrund der geringen Stichprobengröße wenig belastbar und müssen daher mit größeren Stichprobengrößen weiter untersucht werden (vgl. FRIEMERT et al., 2019).

In einer Studie von COMETTI et al. (2018) wurden nicht primär industrielle Arbeitsprozesse untersucht, sondern vielmehr die kognitiven und physischen Funktionen während unterschiedlicher intellektueller und manueller Aufgaben, bspw. Interaktionen mit einem Webbrowser oder die Durchführung schneller Bewegungen. Erneut wurde die OEMG als objektive Messmethode herangezogen. Insbesondere verzeichneten die oberen Extremitäten (Oberarm- und Rückenmuskulatur) der zwölf Versuchspersonen eine höhere Aktivität bei der Nutzung der HoloLens-Datenbrille. Der Kopf fungierte häufig als „Zeiger“, während der Oberkörper als „Controller“ zur interaktiven Auswahl und Anwendung fungierte. Eine weitere interessante Beobachtung war die Tatsache, dass trotz des Gewichtes der HoloLens kein signifikanter Anstieg der Aktivität der Nackenmuskulatur nachgewiesen werden konnte.

5.6.2 *Psychische Einflussfaktoren*

Im Rahmen der psychischen Auswirkungen durch die Nutzung von Datenbrillen zielte der Großteil der bestehenden Studien in erster Linie auf die Erfassung der kognitiven Beanspruchung ab. Dazu wurden Messinstrumente entwickelt, welche die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung darstellen können. Neben dem NASA-TLX (vgl. HART & STAVELAND, 1988) kann dazu auch der Rating Scale of Mental Effort (RSME, vgl. ZIJLSTRA, 1993) eingesetzt werden. Zur Erfassung der erlebten physischen Beanspruchung werden ebenfalls standardisierte Fragebögen genutzt, wie z. B. der Visual Fatigue Questionnaire (VFQ, vgl. BANGOR, 2000).

Zur Untersuchung der psychischen Beanspruchung und Leistung bei einem Einsatz eines HMD wurden in der Studie von WILLE (2016) 41 Probanden einer mit einem HMD oder mit einem Tablet-PC auszuführenden Tätigkeit unterzogen. Die Teilnehmenden der Studie bearbeiteten dabei zwei Aufgabentypen: eine Konstruktionsaufgabe und eine Monitoringaufgabe. Ziel der Studie war neben der Ermittlung der erbrachten Arbeitsleistung die Erfassung der mentalen Beanspruchung der Nutzer im Zuge differenter Instruktions-Technologien. Dafür wurden sowohl subjektive Beanspruchungsparameter, u. a. durch den NASA-TLX, RSME und VFQ, erfasst als auch objektive psychische Beanspruchungsfaktoren untersucht, die mittels Herzfrequenz bzw. Herzratenvariabilität gemessen wurden. Bei der Verwendung eines HDM wurde eine im Vergleich zur Tablet-PC-Anwendung stärkere kognitive Beanspruchung festgestellt. Die Forschenden interpretierten dieses Ergebnis als Resultat eines starken Gewöhnungseffektes, mit dem im Zuge des Einsatzes von Datenbrillen insbesondere zu Beginn der Versuchsdurchführung zu rechnen ist. Hinsichtlich der objektiven Beanspruchungsparameter ergaben sich bei dem beschriebenen Vergleich keine stärker ausgeprägten Beanspruchungswerte. Die beschriebene Studie von THEIS et al. (2016) untersuchte neben den physischen Beanspruchungen ebenfalls kognitive Belastungen der Teilnehmenden im

Umgang mit Datenbrillen. Die Ergebnisse der Studie zeigten im Gegensatz zur Studie von WILLE (2016) keinen signifikanten Effekt der Darstellungsform bzw. des Displaytyps auf die mentale Beanspruchung. Nach KIM & DEY (2009), TUMLER et al. (2008) und TANG et al. (2003) bietet die Anwendung von AR-Technologie allerdings sehr wohl eine Möglichkeit, Aufgaben unterschiedlicher Komplexität zu erleichtern und damit die kognitive Belastung zu verringern.

Im Themenbereich der kognitiven Beanspruchung spielt auch die visuelle Aufmerksamkeit der Versuchspersonen eine wichtige Rolle. Zu diesem Themengebiet wurden in den vergangenen Jahren mehrere Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde der Fokus insbesondere auf die Durchführung von „Dual-Task“-Aufgaben gelegt, d. h. die Rezeption von Informationen und die gleichzeitige Ausführung der eigentlichen Arbeitstätigkeit.

In der Studie von LEWIS & NEIDER (2016) wurde bspw. erforscht, wie sich Sekundärinformationen, die durch die „Google Glass“ visualisiert werden, bei der Durchführung von Suchaufgaben auf die visuelle Aufmerksamkeit auswirken. Zusätzliche Informationen wurden entweder vorab angekündigt und als irrelevant beschrieben oder nicht vorausgesagt. Trotz der Information, dass zusätzliche Informationen irrelevant seien, waren die Teilnehmenden der Studie nicht in der Lage, diese zu ignorieren. Belegt werden konnte dies durch das Ergebnis, dass die Reaktionszeiten der Probanden mit und ohne Ankündigung der Einblendung der additiven Informationen annähernd identisch waren. Die Ergebnisse der Studie brachten die Forschenden zu der These, dass sich bei zukünftigen Aufgaben die Reaktionszeit entsprechend der Komplexität der Aufgabe weiter erhöhen könnte. Im Gegensatz dazu stützten HOU et al. (2013) die Annahme, dass bei wiederholter Nutzung einer AR-basierten Datenbrille im Rahmen von Rüstvorgängen einerseits eine geringere kognitive Beanspruchung und andererseits eine Reduktion der Rüstzeit generiert werden kann.

TEGTMEIER & WISCHNIEWSKI (2018), die sich in einer Laborstudie mit der Thematik des abgelenkten Gehens während der Anwendung einer Datenbrille und somit der Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz beschäftigten, verfolgten eine ähnliche Aufgabenstellung. Monokulare und binokulare Datenbrillen wurden mit einem Klemmbrett bzw. einer papier-basierten Lösung sowie einem Tablet verglichen. Die 36 Probandinnen und Probanden wurden aufgefordert, einen 290 m langen und 75 cm breiten Korridor entlangzugehen und verschiedene kognitive Aufgaben zu bewerkstelligen. Die durchschnittliche Fehleranzahl, die als Indikator für die Arbeitsleistung ausgelegt wurde, war bei der Nutzung einer Datenbrille signifikant höher als bei der Nutzung eines Klemmbrettes. Die Nutzung der Datenbrille verminderte somit im Vergleich zur Anwendung eines Klemmbrettes die Arbeitsleistung der Teilnehmenden während des Gehvorgangs.

PFENDLER & SCHLICK (2007) und HEUER et al. (1989) kommen zu dem Ergebnis, dass ein Zusammenhang zwischen der Bildschirmnutzung und der visuellen Ermüdung des Anwenders besteht. Während STÜDELI (2005) eine signifikante Verbindung zwischen der Nutzungsdauer einer AR-Technologie und der visuellen Ermüdung des jeweiligen Probanden erfasste, konnten ODENTHAL et al. (2011) diesbezüglich im Umgang mit einer Datenbrille keine signifikanten Unterschiede festmachen. Sowohl WILLE et al. (2014) als auch RASH et al. (2002) konnten jedoch einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen der Nutzung eines HMD und der damit einhergehenden visuellen Ermüdung feststellen, der im Hinblick auf eine kontextbezogene Anwendung variieren kann.

Ein wichtiger Faktor zur Implementierung von Datenbrillen am Arbeitsplatz ist in jedem Fall die Akzeptanz der Nutzer, die sich insbesondere durch den Tragekomfort oder Displaykonfigurationen ausdrückt. Der Tragekomfort kann bspw. durch das von der Datenbrille auf den Anwender ausgeübte Gewicht, welches im Wesentlichen auf den Kopf und den Nacken ableitet, negativ beeinflusst werden (WILLE, 2016). Ein fehlender Tragekomfort, der neben einem hohen Gewicht u. a. auch aus einer ungünstigen konstruktiven Gestaltung wie z. B. komplexen Einstellmaßnahmen des Gerätes oder störenden Kontaktflächen des Nutzers mit dem System resultiert, konnte als limitierender Faktor für den zukünftigen Gebrauch von Datenbrillen ausgemacht werden (vgl. GABBARD et al., 2018; KOELLE et al., 2017). Die Forschenden erklärten diese Ergebnisse u. a. mit dem Einsatz einer monokularen Datenbrille, der „Microvision Nomad“, die durch ihre einseitige Beanspruchung entsprechende Nutzungs-Schwierigkeiten hervorrief.

WILLE (2016) zeigte auf, dass ein mangelnder Tragekomfort zunächst nicht eindeutig auf das HMD-Konzept oder die üppige Hardwaregestaltung zurückgeführt werden kann. Ein in der Studie auf Grundlage des beschriebenen Sachverhalts herangezogener Vergleich des „MAVUS-HMD“ mit der Google Glass machte deutlich, dass das Gewicht der Hardware-Ausstattung der jeweiligen Datenbrille einen entscheidenden Einfluss bei der subjektiven Einschätzung des Tragekomforts hat.

Neben dem Tragekomfort bestehen weitere Faktoren, die zur Akzeptanz einer Datenbrillennutzung beitragen. Dazu zählt u. a. die Informationsdarstellung durch die Datenbrille. KIM et al. (2019) deuteten darauf hin, dass die Nutzer eine grafikbasierte Informationsdarstellung einer textbasierten Präsentation vorzogen. Deutlich wurde dieser Umstand durch eine Reduktion der wahrgenommenen Arbeitsbelastung und einer Steigerung der Arbeitsleistung. Weiterhin kann die persönliche Technikaffinität eine Technologie-Akzeptanz beeinflussen. WILLE (2016) verdeutlichte, dass weniger technik-affine Nutzer bei der Nutzung einer Datenbrille einer stärkeren kognitiven Beanspruchung ausgesetzt sind als technik-affine Anwender.

6 Forschungshypothesen

Auf Grundlage der theoretischen Darstellung von AR-basierten Technologien bzw. CPPS im Industriekontext unter besonderer Berücksichtigung wissensbasierter, ergonomischer und nutzerzentrierter Rahmenbedingungen können einige zu prüfende Forschungshypothesen abgeleitet werden.

Das Potenzial von CPPS ist für industrielle Rüst- und Montagevorgänge in der einschlägigen Literatur ausführlich diskutiert worden (vgl. FALLER & FELDMÜLLER, 2016; MONOSTORI et al., 2016). Ob und in welchem Ausmaß diese Systeme effektiv und leistungsfördernd auf die Bedürfnisse der Nutzer eingehen, um sie bei ihrer täglichen Arbeit unterstützen zu können, wurde bislang allerdings nicht eingehend erforscht. Eine nutzerzentrierte Perspektive, d. h. die Berücksichtigung von Bedürfnissen und Praktiken der Anwender, ist dabei in jedem Fall der Schlüssel für das Design und die Entwicklung von nützlichen Lösungen, die den Nutzer zufriedenstellen und gleichzeitig akzeptiert und angeeignet werden können (vgl. WULF et al., 2018).

Die vorliegende Forschungsarbeit orientiert sich an diesem Ansatz. Es wurde ein cyber-physisches Unterstützungssystem konzipiert, das den Nutzer auf einer AR-Basis mitsamt verschiedenster Sensorik unterstützt. Somit kann die folgende übergeordnete hypothetische Aussage abgeleitet werden:

AR-basierte CPPS, die nutzerzentrierten und interaktions-ergonomischen sowie kompatiblen Gestaltungsrichtlinien folgen, unterstützen Arbeitnehmer im Zuge industrieller Rüstprozesse, indem sie zu einem leistungsfördernden Wissenstransferprozess in der alltäglichen Praxis beitragen (H1).

Die Bearbeitung dieser Hypothese zeigt sowohl Möglichkeiten als auch Grenzen auf, die eine solche technologische Unterstützung bieten kann. Obwohl AR-basierte CPPS sowohl propositionales als auch handlungsbezogenes Wissen transferieren können, können technologische Einschränkungen zu einer Limitierung des Wissenstransferansatzes beitragen. Eine etwaige Leistungsoptimierung der Maschineneinrichter kann sowohl direkt, z. B. eine Reduktion der Montagefehler, oder indirekt erfolgen, d. h. bspw. durch die Verringerung der Zeit, die erfahrenere Mitarbeiter investieren müssen, um weniger erfahrenen Kollegen Hilfestellungen zu geben.

Die Forschungslücken hinsichtlich spezifischer, ergonomischer Untersuchungen zur Nutzung AR-basierter Systeme wurden durch die Ausführungen der vorherigen Kapitel deutlich. GARRETT et al. (2018) stellen z. B. fest, dass derzeit keine praktischen Forschungsarbeiten durchgeführt

wurden, die sich mit den sicherheitstechnischen und ergonomischen Auswirkungen einer langfristigen Nutzung von AR-HMD befassen, insbesondere in den Bereichen der Kognition, der Entwicklung von Muskel-Skelett-Erkrankungen des Oberkörpers und der Auswirkungen auf das vestibuläre System. Während Mixed-Reality-Technologien das Potenzial aufweisen, die Produktivität zu steigern und Qualitätsmängel zu reduzieren, sind die Sicherheits- und Ergonomierisiken in industriellen und beruflichen Umgebungen nicht bekannt. Ebenso wiesen REJEB et al. (2021) darauf hin, dass in diesem Zusammenhang nur wenige Studien langfristig ausgerichtete Lösungen für ergonomische Herausforderungen in Bezug auf verschiedene Arbeitsbedingungen vorschlagen. Zu diesen Herausforderungen zählen u. a. Überlegungen zur Komfortsteigerung von HMD, bspw. hinsichtlich der Gewichtsverteilung (vgl. ITO et al., 2021). Im Zuge dessen besteht nach wie vor speziell hinsichtlich praxisnaher industrieller Montage- und Rüsttätigkeiten sowie binokularer und gestengesteuerter AR-Anwendungen ein essenzieller Bedarf an ergonomischen Untersuchungen, die sowohl auf quantitativen als auch auf qualitativen Daten basieren. Die teils inkonsistenten oder nicht existenten Ergebnisse und die zumeist geringen Stichprobengrößen der beschriebenen Studien machen deutlich, dass es weiterer Untersuchungen bedarf, um mögliche Unterschiede in der physischen und kognitiven Beanspruchung zwischen klassischen Arbeitstätigkeiten und mithilfe digitaler Assistenzsysteme unterstützten Arbeitssystemen zu eruieren. Eine Evaluierung der durch das Tragen von Datenbrillen hervorgerufenen Risiken mitsamt einer etwaigen thermografischen Beeinträchtigung erfolgte z. B. auf wissenschaftlicher Ebene bis dato nicht. Mit dieser Arbeit wurden am Beispiel der Nutzung eines AR-gestützten prototypischen Assistenzsystems im Zuge industrieller Rüstprozesse diese Forschungslücken durch die Formulierung der nachfolgend beschriebenen Arbeitshypothesen adressiert und operationalisiert.

Die cyber-physische Rüstapplikation wurde mithilfe der HoloLens der ersten Generation realisiert. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Fokus der Forschung jedoch nicht auf der Beurteilung des Produktes „HoloLens“, sondern vielmehr auf der Evaluierung und der Einschätzung eines nutzerzentrierten und physisch sowie psychisch oder kognitiv angemessenen Einsatzes derartiger Hilfsmittel per se ausgerichtet ist. Mit anderen Worten dient der vorliegende Untersuchungsgegenstand als Mittel zum (Forschungs-)Zweck.

Die Nutzung der HoloLens führt im Vergleich zu einer herkömmlichen bzw. mithilfe von papierbasierten Anleitungen durchgeführten Arbeitstätigkeit bei industriellen Rüstprozessen

zu einer höher einzuschätzenden Gefährdung am Arbeitsplatz (H2).

Darüber hinaus kann der Umgang mit derartigen Head-Mounted Displays sowohl im Rahmen einfacher Montagetätigkeiten und statischer Blickpositionierungen als auch im Zuge eines Rüstvorgangs einer Rotationszugbiegemaschine

zu einer Veränderung der objektiven (H3) und subjektiv empfundenen Muskelbeanspruchung im Schulter-Nacken-Bereich (H4) sowie zu objektiven (H5) und individuell erlebten Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich (H6).

Die Konzeption und Interaktion neuartiger AR-basierter Datenbrillen bedingt weiterhin, dass der Umgang mit diesen Systemen in

der Erhöhung kognitiver Beanspruchungsparameter resultiert (H7), die jedoch mit fortschreitender Tätigkeitsdauer bzw. repetitiver Nutzung abnehmen (H8).

Außerdem ist ein

Unterschied hinsichtlich der visuellen Ermüdung zwischen der Nutzung und Nicht-Nutzung der HoloLens zu verzeichnen (H9).

Das übergeordnete ökonomische Ziel des Forschungsvorhabens war auf eine anhand des Systems herbeizuführende Reduzierung der Rüstzeit ausgerichtet. Demnach verhilft das Unterstützungssystem

zu einer Reduktion der zeitlichen Dauer einer Arbeitstätigkeit (H10) und zu einer Verringerung der Fehleranzahl innerhalb des durchzuführenden Aufgabenspektrums (H11).

Zur Verifizierung respektive Falsifizierung der Forschungshypothesen H3 bis H11 wurden zwei experimentelle, kontextspezifische Studien durchgeführt, um mehrheitlich quantifizierbare Daten als Bewertungsgrundlage heranziehen zu können. Innerhalb der Laborstudien und insbesondere im Rahmen der umfassenden empirischen Feldstudie wurden qualitative Daten erhoben, die als Beurteilungsmaßstab für die Arbeitshypothesen H1 und H2 genutzt werden konnten.

7 Versuchsdesign und Methode

In Anbetracht des wachsenden Interesses an menschlichen Praktiken für die Gestaltung und Qualitätsbewertung digitaler Technologien wurde das sogenannte „Grounded Design“ als Paradigma für die Designforschung und -praxis eingeführt. Es zielt auf die Untersuchung von Veränderungen der menschlichen Praktiken ab, die aus der Nutzung und Aneignung digitaler Technologien resultieren (vgl. ROHDE et al., 2016). Die Ergebnisse solcher Untersuchungen werden als Input für die Konzeption neuer und innovativer digitaler Lösungen genutzt. In diesem Zusammenhang bietet die Designfallstudie, die sich mit einer empirischen (Vor-)Studie, einem Entwurf einer innovativen Darstellungsform und einer praxisnahen Evaluierung und Aneignung des Systems in drei voneinander abhängige Phasen gliedert, eine geeignete methodische Infrastruktur für eine erfolgreiche Umsetzung des Grounded Design (vgl. WULF et al., 2015). Die Designfallstudie stellt m. a. W. dazu einen methodischen Rahmen für die Gestaltung und Entwicklung innovativer sozio-technischer Systeme oder Designimplikationen, sogenannter Artefakte, dar. Aufgrund möglicher, teils stark unterschiedlicher Vorgehensweisen des Menschen im Zuge praktischer Tätigkeiten sollte das Design eines Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Tools auf den Menschen ausgerichtet sein. Dabei wird ein nutzerzentrierter Design-Ansatz verfolgt, der die Wechselwirkungen sozialer Praktiken mit den Artefakten analysiert. Innerhalb von drei voneinander abhängigen Phasen erfolgt zunächst – basierend auf einer empirischen Analyse des Handlungsfeldes mit- samt des Nutzerkontexts, der Praktiken und den daraus resultierenden Bedürfnissen (1) – ein Designprozess (2), innerhalb dessen neue Lösungen auf Grundlage der identifizierten Bedürfnisse entworfen werden. Die Designfallstudie wird mit einer Aneignungs- bzw. Evaluierungsphase (3) abgeschlossen, in der die Lösungen in einem realen Szenario getestet und im Hinblick auf deren Auswirkungen sowie hinsichtlich aller resultierenden sozialen Veränderungen bewertet werden. Durch diese methodische Vorgehensweise wird verdeutlicht, wie CPPS die Bedürfnisse der Nutzer im Rahmen industrieller und komplexer Rüstvorgänge, bezogen auf den als Anwendungsfall dienenden Rüstprozess an einer Rotationszugbiegemaschine, unterstützen und eine adäquate Hilfestellung geben können.

Um die gewonnenen qualitativen Erkenntnisse verifizieren bzw. falsifizieren und schließlich um quantitative Komponenten erweitern zu können, wurde das „Exploratory Sequential Design“ (vgl. CRESWELL, 2014; CRESWELL et al., 2007) herangezogen. Dieser Mixed-Methods-Ansatz beruht auf der Analyse von sowohl qualitativen als auch quantitativen Daten, die in zwei interaktiven Phasen sequenziell gesammelt, priorisiert und in eine oder mehrere Phasen des Forschungsprozesses integriert werden. Das exploratorische sequenzielle Design beginnt mit der Erhebung und Ana-

lyse qualitativer Daten. Auf diese erste Phase folgen die Erhebung und Analyse quantitativer Daten. Der gewählte methodische Ansatz schafft mittels der Integration verschiedener Datenerhebungen sowohl eine breite als auch tiefe Erkenntnisbasis über das Forschungsfeld. Durch die sequenzielle Vorgehensweise sind die qualitativen und quantitativen Untersuchungssegmente unterscheidbar und sowohl einzeln als auch gemeinsam analysierbar sowie interpretierbar (GUETTERMAN et al., 2015).

Um den Rüstprozess zur ergonomischen Bewertung der Arbeit auch hinsichtlich potenzieller Risiken zu Gefährdungen der Arbeitsperson analysieren respektive quantifizieren zu können, wurden mit der Leitmerkmalermethode und dem „Ergonomic Assessment Worksheet“ zudem ein spezielles Screening- und ein Experten-Verfahren angewendet. In der Aneignungs- bzw. Evaluierungsphase wurden außerdem zusätzliche (ergonomische) Teilstudien durchgeführt, die im Zuge einer ganzheitlichen arbeitswissenschaftlichen Analyse eine Objektivierung und Subjektivierung zum Umgang mit AR-basierten CPPS in Bezug auf Montage- oder Rüstvorgängen vorsehen. Dabei erfolgte die Untersuchung der in den Forschungshypothesen aufgeführten Aspekte zur physischen und psychischen Beanspruchung sowie zur Leistungserbringung in Folge der Nutzung eines HMDs während einfacher Montagetätigkeiten und statischer Blickpositionierungen sowie im Zuge eines (dynamischen) Umrüstprozesses einer Rotationszugbiegemaschine. Die messtechnische Erfassung physiologischer Parameter wurde, basierend auf einem Vergleich zwischen der Durchführung der Arbeitsaufgabe mit einer digitalen bzw. holografischen und einer papierbasierten Unterstützung, durch unterschiedliche Fragebogeninstrumentarien, d. h. standardisierte Fragebögen und ein teilstrukturiertes, qualitatives Interview, zum subjektiven Beanspruchungserleben und zu Usability-Aspekten ergänzt.

7.1 Beschreibung des Versuchsdesigns

An der empirischen (Feld-)Studie nahmen insgesamt 25 männliche Arbeitspersonen aus fünf verschiedenen KMUs mit unterschiedlicher Berufs- bzw. Rüsterfahrung teil. Für die in einer natürlichen bzw. praxisnahen Umgebung durchgeführte Evaluierung wurden weitere 15 Teilnehmer aus insgesamt vier KMUs einbezogen. In der ersten experimentellen Studie waren 12 Versuchspersonen und in der zweiten Teilstudie 24 Probanden involviert. Neben den jeweiligen Studieninhalten respektive Versuchsabläufen werden die spezifischen Merkmale des ausgewählten Probandenkollektivs nachfolgend im Detail beschrieben.

7.1.1 *Empirische Feldstudie und Evaluierung*

Auf Grundlage einer „Grounded Design“-Initiative sollten in Bezug auf industrielle Rüstprozesse zunächst qualitative Daten aus Nutzerstudien generiert werden, um daraus schließlich Designimplikationen und konkrete Systemanforderungen abzuleiten, die einerseits vom Nutzer selbst verwendet werden können und andererseits Entwickler und Designer bei der Konzipierung nützlicher sowie nutzbarer Systeme unterstützten. Dazu wurde eine **empirische Analyse des anwendungsbezogenen Handlungsfelds**, d. h. des Rüstprozesses an Umform- bzw. Biegemaschinen, durchgeführt. Sie ist als Vorstudie charakterisiert und deckt als solche diejenigen Nutzerpraktiken auf, die das Potenzial aufweisen, durch technische Lösungen begleitet zu werden. Die Beschreibung der Praktiken, die technologische, organisatorische und soziale Perspektiven beinhalten, erfolgt minutiös. Die Analyse bedient sich dabei qualitativer empirischer Methoden, um eine Reflexion der potenziellen Nutzer in Bezug zu ihrer Praxissituation anzustreben. Daraus resultieren Anforderungen hinsichtlich Gestaltungsimplicationen eines möglichen technischen Lösungsansatzes. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die untersuchten Rüstvorgänge hinsichtlich ihrer praktischen Konzipierung zwar z. T. im Detail unterschieden, bspw. in Bezug auf einzusetzende Werkzeugelemente und die Anzahl der erforderlichen Rüstschritte, jedoch im Hinblick auf grundlegende Merkmale von Rüstprozessen an Umform- oder Biegemaschinen vergleichbar sind. Aufgrund der unternehmerischen Pflichten zum Datenschutz können die einzelnen Schritte der Rüstvorgänge nicht vorgestellt werden. Neben Biegemaschinen für kleine (12-24 Rüstschritte) und große Rohrdurchmesser (12 Rüstschritte) wurde auch eine Presse zum Stanzen von Metallbändern (12 Rüstschritte) sowie eine Spezialmaschine zur Herstellung von flexiblen Metallschläuchen (> 90 Rüstschritte) betrachtet.

Im Forschungsprojekt „Cyberrüsten 4.0“ wurde ein ethnographischer Ansatz gewählt, um die Praktiken und den sozialen Kontext von Maschineneinrichtern sowie deren mögliche Auswirkungen auf die Gestaltung neuer Technologien zu verstehen. Ethnographische Forschung zielt in erster Linie darauf ab, „das Unsichtbare sichtbar zu machen“ (GOODWIN, 1994), indem die implizite, soziale und kulturelle Organisation beschrieben wird, welche wiederum die Aktivitäten der Teilnehmer charakterisiert (vgl. ANDERSON-LEVITT, 2006). Im Zuge der Analyse wurde eine interaktionsanalytische Sichtweise eingenommen, welche die sequenzielle Organisation von Aktivitäten und die Denkprozesse derjenigen betont, die sie ausführen, sowie derer, die sie zu verstehen versuchen. In dieser Sichtweise führen die Akteure, d. h. die Maschineneinrichter, durch ihre kollaborative Arbeit oft Aktivitäten aus, die eng miteinander verbunden sind, ohne dass sie ihre Handlungen explizit besprechen (vgl. HEATH & LUFF, 1991). Vereinfacht ausgedrückt wird gegenseitiges Verständnis erreicht, ohne auf explizite Anweisungen zurückzugreifen.

Beobachtungen bzw. Hospitationen wurden in Feldnotizen festgehalten. Für eine sehr engmaschige Analyse eines komplexen Rüstvorgangs wurden nach Einwilligung der Teilnehmer (siehe Abb. A1-A2, Anhang A) ergänzend zu sogenannten „Shadowing“-Sitzungen, d. h. zu Beobachtungen der Probanden für eine bestimmte Zeit, ohne diese zu beeinflussen, zur Erhebung von In-situ-Daten zu Arbeitspraktiken und sozialer Interaktion detailgenaue Videoaufnahmen benötigt, u. a. unter Zuhilfenahme einer Eye-Tracking-Technologie (Tobii® Pro Lab oder Tobii® Pro Glasses, vgl. N.N., 2018b). Eye-Tracking verhilft durch die Erfassung des Blickes bzw. der Fixationen dazu, durch Heatmap-Analysen ein intensives Verständnis zu den durchgeführten Handlungen sowie zu den im Rahmen der Rüstvorgänge genutzten Werkzeugen und Montagehilfsmitteln aufzubauen. Zusätzlich dazu wurden die Teilnehmer aufgefordert, während der Aufzeichnung dem „Think Aloud“-Prinzip zu folgen, um sie mithilfe von „lautem Denken“ dahingehend zu provozieren, ihre derzeit ausgeführte Tätigkeit zu verbalisieren und damit Informationen über ihre Überlegungen im Verlauf des Aufbaus zu sammeln (vgl. NIELSEN, 1993). Zusammen mit den transkribierten Kommentaren der Teilnehmer konnten so auch komplexe Prozessschritte in ihrer Gesamtheit erfasst und ausgewertet werden.

Um die Praktiken des Wissenstransfers granular untersuchen zu können, wurden semi-strukturierte „In-depth“- oder Experteninterviews (vgl. HERMANOWICZ, 2002) durchgeführt (siehe Abb. A3-A5, Anhang A). Diese wurden ebenfalls aufgezeichnet und transkribiert. Während die Beobachtungsphasen eine Dauer zwischen 45 und 90 Minuten aufwiesen und die Shadowing-Sitzung zwischen 3 und 4 Stunden andauerten, wurden die Interviews in 45 bis 120 Minuten durchgeführt. Die Interviewtranskription erfolgte nach der Methode des „Intelligent Verbatim“, bei der sämtliche sprachliche Äußerungen Wort für Wort transkribiert werden, mit Ausnahme von nuschelnden bzw. unverständlichen Aussprachen (z. B. „äh“ oder „mh“), Füllwörtern (z. B. „also“, „ja“ oder „halt“) und Versprechern (vgl. HICKLEY, 2016).

Interviewtranskripte, Feldnotizen, Eye-Tracking-Aufnahmen und prozessrelevante firmeninterne Dokumente wurden einer thematischen Analyse unterzogen. Die thematische Analyse umfasst eine offene Kodierung der Medienausschnitte, die systematische Überprüfung der kodierten Segmente und die Identifizierung von Code-Familien und ihrer Beziehungen (vgl. BRAUN & CLARKE, 2012). Neben einem Textverarbeitungs- und Tabellenkalkulationsprogramm der Firma Microsoft® wurde zudem ein qualitative Datenanalyse-Tool der Firma MAXQDA® angewendet. Teile der Daten bzw. Medienausschnitte wurden mit einer Mischung aus Bottom-up- und Top-down-Ansatz kodiert (siehe Abb. 7.1 und Abb. A6-A8, Anhang A). Bei letzterem wird eine vor Beginn der Analyse erstellte Liste von Codes verwendet, die u. a. aus Literaturübersichten oder

Interviewleitfäden stammen kann. Bei einem Bottom-up-Ansatz werden empirische Codes verwendet, die sich aus der intensiven Beschäftigung mit den Daten ergeben. Auf der Grundlage der Beziehungen zwischen den identifizierten Codes werden inhaltliche Themen erstellt. Diese methodische Abfolge ermöglicht die Erarbeitung eines tiefen Verständnisses der untersuchten Kontexte respektive Phänomene (vgl. AYRES, 2016; BRAUN & CLARKE, 2012; GIBSON & BROWN, 2009).

Die Erkenntnisse aus den verschiedenen Datenartefakten wurden außerdem trianguliert, um ihre Vertrauenswürdigkeit und Authentizität als Qualitätskriterium für qualitative Forschung zu gewährleisten (vgl. BRYMAN, 2008). Mit anderen Worten wurden die Ergebnisse, die aus den mit den verschiedenen Methoden erhobenen Daten gewonnen wurden, gegeneinander abgeglichen und auf ihre Konsistenz geprüft. Außerdem konnte die Erkenntnisgewinnung durch eine systematische Datenanalysetechnik unterstützt werden (vgl. BRAUN & CLARKE, 2012). Die in Kapitel 8 dargestellte Beschreibung des Arbeitsablaufs stammt bspw. vollständig aus den gewonnenen Feldnotizen. Die sich daraus ergebenden Erkenntnisse wurden mit den Interview- und Eye-Tracking-Daten abgeglichen, die bei der Ergebnisdarstellung mitunter durch Zitate bzw. seitens der Teilnehmer getätigten Äußerungen gestützt und dadurch konkretisiert werden.

Die sich anschließende „Entwurf“-Phase zur **Entwicklung einer innovativen Darstellungsform** umfasst neben der Anwendung nutzerzentrierter und partizipativer Designmethoden (vgl. MULLER & KUHN, 1993) unter Berücksichtigung ergonomischer Richtlinien (vgl. u. a. DIN EN ISO 9241-210, 2020) die Beschreibung spezifischer Designprozesse und der involvierten Akteure. Somit wird dem Aufbau respektive der Gestaltung eines technischen Systemkonzepts Rechnung getragen. Auf Grundlage der empirischen Ergebnisse können folglich innovative IKT-Artefakte entwickelt werden, die sowohl produkt- als auch prozessspezifisch beschreibbar sind. Die Entwicklungsphase ist zudem durch kontinuierliche Evaluierungsphasen charakterisiert. Zur Gewährleistung der Validität der Forschungsmethode werden praxisbezogene Dokumente, Beobachtungen und Interviews der Fokusgruppe analysiert. Dabei werden aufgrund des technischen Fortschritts eintretende bzw. vorhersehbare Veränderungen der Praktiken dokumentiert und deren Einfluss auf das Design des IKT-Artefakts herausgestellt.

Die Designimplikationen wurden also erarbeitet, indem die empirischen Ergebnisse mit der bestehenden Literatur zum Design von CPPS in Verbindung gesetzt wurden. Sie haben demnach die Designaktivitäten der zweiten Phase wesentlich kanalisiert. In dieser Phase werden auf Grundlage der Analyse der in der Vorstudie gesammelten Daten Personas (archetypische Nutzerbedürfnisse, vgl. PRUITT & GRUDIN, 2003), Szenarien (vgl. CARROLL, 2000), Prototypen mit geringem

Detaillierungsgrad (bspw. Skizzen und Storyboards) und Prototypen mit mittlerem Detaillierungsgrad, d. h. visuelle („Mock-ups“) und konzeptionelle („Wireframes“) Prototypen, erstellt und in verschiedenen Iterationen getestet, bis eine stabile Version eines funktionalen Prototyps erreicht ist. Die Ausarbeitung und Verfeinerung der entworfenen Artefakte erfolgt nach einem partizipativen Designansatz, der die Einbeziehung der repräsentativen Nutzer in die Designentscheidungen hinsichtlich Funktionalität und Konzeption über die gesamte Designphase hinweg beinhaltet. In einer Reihe von Design-Workshops hatten die repräsentativen Teilnehmer die Möglichkeit, auf integrative und demokratische Weise aktiv zur Gestaltung der entworfenen Lösungen beizutragen (vgl. WULF et al., 2015; DISALVO et al., 2013; BJÖRGVINSSON et al., 2010).

Basierend auf den identifizierten Anforderungen wurden zwei Szenarien ausgearbeitet, die mit Hilfe von Storyboards illustriert wurden. Diese wurden verwendet, um die Diskussionen in den Design-Workshops zu fördern und mit den Teilnehmern abzustimmen, wie bei der Gestaltung und Entwicklung der Systemunterstützung vorgegangen werden soll.

Insgesamt wurden drei Design-Workshops durchgeführt. Die Design-Workshops dauerten zwischen vier bis acht Stunden an und wiesen eine Gruppengröße von jeweils sechs Teilnehmern auf. Die Design-Workshops wurden aufgezeichnet, transkribiert und ebenfalls einer thematischen Analyse unterzogen. Nach den Design-Workshops erfolgte das „Rapid Prototyping“ der jeweiligen Mock-ups oder Wireframes, die jeweils potenzielle Interfaces bzw. Schnittstellen der CPPS-Lösung aufzeigen. Diese frühen Prototypen und die Technologie, die für das Unterstützungssystem ausgewählt wurde, werden formativen Usability-Inspektions- und Evaluierungsmethoden unterzogen, wie z. B. einer heuristischen Evaluation (vgl. NIELSEN & MOLICH, 1990). Ziel war es dabei, die wichtigsten Usability-Probleme zu beseitigen, bevor das Tool den Nutzern zur Verfügung gestellt wird. Somit kann das System in die Arbeitsinfrastruktur integriert und für tägliche Aktivitäten genutzt werden. Das Ergebnis dieser Phase ist in der Regel ein voll funktionsfähiger Prototyp, der in den Benutzerkontext eingeführt und effektiv genutzt werden kann.

Um zwischen ethnographischen Daten und Designanforderungen für interaktive Systeme zu vermitteln, können auch formale Artefakte oder Modelle herangezogen werden. Wie in Kapitel 4 beschrieben, können diese auf unterschiedliche Art und Weise den Fortschritt und die Umsetzung neuer und innovativer Technologien unterstützen. In jedem Fall sollen jedoch Schlüsselmerkmale aufgedeckt werden, die auf wiederkehrende soziale Phänomene hinweisen, die wiederum als Inspiration für den Gestaltungsprozess dienen können (vgl. DENEFF & KEYSON, 2012; CRABTREE ET AL., 2002; MARTIN et al., 2002). In Bezug auf den vorliegenden rüstspezifischen Kontext wurde der Übergang von der kontextuellen (Feld-)Studie zu den Designimplikationen anhand eines Wis-

senstransfermodells sowie eines Aufgabenmodells dargestellt. Ersteres stellt die empirisch erhobenen Daten unter besonderer Berücksichtigung der Wissensträger und -empfänger in einem situativen und organisatorischen Kontext und unter Berücksichtigung identifizierter Probleme dar. Das Wissenstransfermodell als solches impliziert eine Darstellung dieser Probleme und der durchgeführten Designaktivitäten. Die Erkenntnisse bringen auch den Stand der Technik an sich voran, indem sie die Tendenzen in industriellen Kontexten aufdecken, die derzeit noch wenig erforscht sind. Das Aufgabenmodell stellt die Praktiken der Studien-Teilnehmer während des Rüstprozesses von Industriemaschinen dar. Während Aufgabenmodelle in der Literatur insbesondere als leistungsfähige Ressourcen für die Gestaltung nutzerfreundlicher interaktiver Systeme diskutiert werden, sind traditionelle Modelle aus dem HCI-Forschungsbereich eher auf psychologische Prozesse und deren Darstellung in mentalen Modellen ausgerichtet (vgl. PATERNÒ, 2005; NORMAN, 1998). In der vorliegenden Arbeit wurde auf Grundlage ethnomethodologischen Ansatzes Letzteres verfolgt, um einige kognitive Aufgabenmodelle für eine praxisorientierte Aufgabenmodellierung zu nutzen.

Den Abschluss des methodischen Konstrukts bildet eine **Evaluierung der Erkenntnisse in der Praxis**, die auf eine Längsschnittstudie zur Untersuchung und detaillierten Dokumentation des Einsatzes der entwickelten technologischen Artefakte innerhalb der sozialen Nutzersysteme abzielt. Das Design wird durch den Nutzer reflektiert und hinsichtlich der Aneignung des Artefakts bzw. der Wirkung auf den Nutzer innerhalb der Praxis überprüft. Dadurch kann das Ausmaß, inwieweit der entwickelte Lösungsansatz den Anforderungen der Nutzer gerecht wird, evaluiert und potenzielle Designänderungen erörtert werden.

Dazu wurde, auch auf Grundlage identifizierter Verbesserungen, die sich aus der heuristischen Evaluation ergaben, der Prototyp, der für die HoloLens der ersten Generation umgesetzt wurde, einer zweistufigen Evaluierungsstudie unterzogen. In der **ersten Phase** der Evaluierung wurde das System in einer natürlichen Umgebung, d. h. in den Unternehmen respektive in der Praxis, getestet. Während erfahrene und entsprechend qualifizierte Maschineneinrichter den sogenannten „Schreiben“-Modus der Applikation anwendeten, wurden unerfahrene bzw. anzulernende Arbeitspersonen dem Testszenario „Lesen“- und „Konfiguration“-Modus zugeordnet (siehe Kapitel 8.2.2). Diese Einordnung entspricht dem eigentlichen Zweck der zwei Modi „Lesen“ und „Schreiben“, wengleich die „Konfiguration“ auch erfahrenen Maschineneinrichtern zuteilwerden kann. Die Teilnehmer wurden erneut zur Anwendung der Thinking-Aloud-Strategie aufgefordert. Nach der nutzerspezifischen Kalibrierung der Datenbrille und der Einführung in den grundlegenden Arbeitsablauf der HoloLens-Anwendung begann der Proband mit dem Rüstprozess. Den Abschluss der Evaluierung bildete in Anlehnung des in Phase 1 der Designfallstudie durchgeführten Interviews ein etwa 30-minütiges Gespräch (siehe Abb. A9, Anhang A), durch das die Maschineneinrichter

Rückmeldungen hinsichtlich ihrer persönlichen Nutzererfahrung geben konnten, bspw. in Form unklarer Systemzustände oder etwaiger Verbesserungen. Die Dauer des gesamten Evaluationsprozesses variierte in Abhängigkeit des Rüstvorgangs und des zu testenden Modus zwischen mindestens zwei und maximal sieben Stunden. Insgesamt wurden vier Rüstprozesse bei vier unterschiedlichen Unternehmen definiert, bestehend aus einem Montage- und einem Demontageprozess, und zugehörige Daten des zu fertigenden Artikels aufbereitet, u. a. Artikelnummer, -bezeichnung, -merkmale und -zeichnung. Neben den Artikeldaten und den rüstspezifischen Daten, z. B. Bezeichnung des Werkzeugs, benötigte Montagehilfsmittel und benötigte Verbindungselemente, erfolgte auch die Aufbereitung der CAD-Daten für die jeweiligen Werkzeuge für das AR-basierte CPPS. Aus datenschutzrechtlichen Gründen können die einzelnen Rüstschritte nicht im Detail dargestellt werden, sondern nur der Gesamtumfang der jeweiligen Rüstvorgänge (Abb. 7.1).



Abb. 7.1: *Evaluierung des entwickelten Unterstützungssystem in unterschiedlichen Unternehmen bzw. in Bezug auf verschiedene Rüstprozesse*

Der Rüstvorgang in Unternehmen „Y“ (siehe Abb. 7.1, links) war durch eine erhöhte Komplexität gekennzeichnet. Zum einen umfasste der Prozess über 90 Arbeitsschritte, innerhalb derer mit kleinen und z. T. schwer zugänglichen Werkzeugkomponenten hantiert werden musste. Weiterhin waren die einzelnen Rüstschritte durch eine stark ausgeprägte räumliche Distanz bzw. Verteilung gekennzeichnet. Die Rüstvorgänge in Unternehmen „X“ und „Z“ (siehe Abb. 7.1, mittig und rechts) wurden auf unterschiedlichen Maschinen durchgeführt, sind aber in ihren Merkmalen ähnlich. Im Gegensatz zu dem Rüstvorgang von Unternehmen Y war zwar die Anzahl der für den Rüstvorgang notwendigen Werkzeuge geringer, allerdings waren diese Werkzeuge deutlich größer und z. T. schwieriger zu handhaben. Demgegenüber stand eine räumliche Konzentration der Werkzeuge und überwiegend leichte Zugänglichkeit. Für den Rüstprozess von Unternehmen „W“ wurden etwa 24 Rüstschritte mit mehrheitlich kleinen Werkzeugen durchgeführt, die ebenfalls räumlich konzentriert waren und auf einer Biegemaschine montiert werden mussten.

Die Analyse der Beobachtungsnotizen und der transkribierten Interviewdaten wurde – wie bereits in der empirischen Datenerhebungs-Phase – einer thematischen Analyse und einer Kodierung unterzogen. Die Ergebnisse dieser Tests wurden wiederum in kurzen Umgestaltungszyklen berücksichtigt, bis eine stabile Version des Prototyps generiert werden konnte. Diese stabile Version wurde im Rahmen von Usability-Tests bzw. von ergonomischen Untersuchungen unter Laborbedingungen getestet (**Phase 2**), in dem eine komplette CPPS-Infrastruktur, einschließlich einer 3D-Kamera als Sensor, einbezogen werden konnte. Diese Infrastruktur konnte nicht in den Unternehmen konfiguriert oder eingerichtet werden, da sich dies negativ auf die produktiven Tätigkeiten der Unternehmen ausgewirkt hätte. Methodische und inhaltliche Bestandteile der Labor-Phase sind den im Folgenden beschriebenen Teilstudien zu entnehmen.

Beide Phasen der Studie wurden nach einem Mixed-Methods-Ansatz konzipiert, d. h. die Analyse umfasste sowohl qualitative als auch quantitative Daten, die sich gegenseitig ergänzten (vgl. CRESWELL, 2014; BRYMAN, 2008). Beide Phasen basierten auf einer kooperativen Evaluation, einer gut etablierten Methode zum Testen interaktiver Systeme. Als solche wurden sie nach dem Laufzeit-Leitfaden von MONK et al. (1993) geplant und durchgeführt. Zwei Videokameras wurden auf zwei Stativen an strategisch günstigen Stellen angebracht, um die externen Interaktionen und Reaktionen der Anwender bei der Bearbeitung der Aufgaben und im Zuge der Nutzung des rüstspezifischen Software-Prototyps aufzunehmen. Ein Ansteckmikrofon, das mit einem tragbaren Audiorekorder verbunden war, wurde ebenfalls verwendet, um die Kommentare der Benutzer während der Bewertung des Systems innerhalb der ersten Phase aufzunehmen. Außerdem wurden aufschlussreiche Kommentare und Eindrücke von der Interaktion handschriftlich festgehalten.

Mithilfe von ergonomischen Bewertungsverfahren, d. h. der LMM und der EAWS, wurden zudem die Arbeitssituationen im Rahmen eines industriellen Rüstprozesses analysiert. Zur Beurteilung der rüstspezifischen Arbeitsinhalte standen die beschriebenen Videoaufnahmen zur Verfügung. Zusätzlich wurden die Maschineneinrichter zu prozessrelevanten Eigenschaften befragt, um eine umfangreiche und detaillierte Analyse gewährleisten zu können. Aus datenschutzrechtlichen Gründen lagen jedoch nicht sämtliche Detailinformationen vor, weshalb manche Einordnungen in Bewertungsskalen einer Abschätzung unterliegen. Bei der Durchführung des Screeningverfahrens ist das Vorgehen nicht unüblich, da die Verfahren oft selbst nur qualitative Skalen bereitstellen. Im Detailverfahren hat die Bewertung hingegen jedoch verstärkten quantitativen Charakter.

7.1.2 Teilstudie 1 („HoloErgo“)

Zur Untersuchung möglicher Belastungen und Beanspruchungen im Umgang mit einem AR-basierten HMD wurde eine experimentelle ergonomische Laborstudie durchgeführt. Als Untersuchungsgegenstand diente in Anlehnung an die empirische (Feld-)Studie die Mixed-Reality-Datenbrille HoloLens. Durch den Umgang mit der ersten Generation der HoloLens, deren Interaktion nicht auf einer Eye-Tracking- sondern auf einer gesten-gesteuerten Funktion basiert, wird der Fokus der physischen Beanspruchung des Anwenders auf die Muskelphysiologie und die physikalische Interaktion gelegt. Neben der Muskelaktivität im Schulter-Nacken-Bereich wurden auch Komfortbedingungen im Kopfbereich mithilfe der Oberflächen-Elektromyographie und durch eine Wärmebildkamera objektiv erfasst. Subjektiv empfundene Mehraufwände wurden durch ausgewählte standardisierte Befragungen hinsichtlich physischer bzw. muskulärer Wahrnehmung und kognitiver Beanspruchung evaluiert. Neben der messtechnischen Datenerfassung wurde der gesamte Versuch über eine Videokamera aufgezeichnet.

Die beschriebenen Aspekte sollten auf Grundlage des Vergleichs einer Durchführung mit und ohne digitalem Unterstützungssystem in zwei Versuchsreihen und insgesamt sechs unterschiedliche Versuchsdurchläufe zum einen in Bezug **auf einfache Montagetätigkeiten (I)** sowie hinsichtlich **statischer Blickpositionierungen (II)** untersucht werden. Einleitend soll aber zunächst der Entscheidungsfindungsprozess zur Ermittlung dieser finalen Versuchsbedingungen aufgezeigt werden. Neben den theoretischen Abwägungen wird hierzu auch auf die Erfahrungen aus den durchgeführten Voruntersuchungen zurückgegriffen.

Der für die Montagetätigkeiten eingesetzte LEGO-Bausatz „SUPER SOARER – 31042“ beinhaltet ein einhundertteiliges Set, mit dem insgesamt drei verschiedene Flugzeugmodelle gebaut werden können. Für den Zusammenbau der drei Typen ist die Abarbeitung von 120 Montageschritten erforderlich. Die vorhandenen Anleitungen mussten allerdings für die Versuchsreihe inhaltlich angepasst und reduziert werden, um eine übersichtliche Darstellung der Instruktionen sowie eine angemessene Durchführungszeit gewährleisten zu können. Hierzu wurden die benötigten Informationen, d. h. die Bauteile und deren Anzahl, die Nummer des Montageschritts sowie ein Abbild des Montagefortschritts, auf einem DIN-A4-Blatt (21 cm x 29,7 cm) visualisiert.

Umgebungsbezogene Störeinflüsse, wie z. B. eine Geräuschquelle, konnten in einem Versuchs- bzw. Laborraum weitestgehend beseitigt werden. Die klimatischen Bedingungen, d. h. die Lufttemperatur (20 bis 23 °C), die Luftfeuchtigkeit (ca. 45 bis 50 %) und die Windgeschwindigkeit (< 0,05 m/s), lagen mitsamt der Beleuchtungssituation (ca. 1.000 lx) innerhalb der den Tätigkeiten entsprechenden Behaglichkeitsbereichen (vgl. Arbeitsstättenrichtlinie, ASR A3.4 und A3.5).

Um eine umfangreiche Einbeziehung von verschiedenen Blickpositionen zu gewährleisten, erfolgte eine horizontale und vertikale Verteilung der entsprechenden Montageanweisungen in dem Laborraum (4 m x 3,75 m x 3,5 m). Zur Differenzierung der verschiedenen Blickrichtungen der Probanden auf die jeweiligen Montageanweisungen wurde ein auf unterschiedlichen Intensitätsstufen basierendes Kategoriensystem erstellt, das zwischen leichten (0 bis 45 °), mittleren (50 bis 65 °) und schweren bzw. starken (90 °) seitlichen Kopfbewegungen unterscheidet. Innerhalb dieser horizontalen Blickrichtungen wurde auf Grundlage einer Augenhöhe von 165 cm, die als gemittelter Wert dem 50. Perzentil des Mannes entspricht (vgl. DIN 33402-2), zusätzlich auch zwischen verschiedenen vertikalen Höhen der Montageanweisungen unterschieden, die in Abständen von ca. 30 bis 45 ° ausgerichtet wurden. Somit wurden definierte Kopfbewegungen provoziert, die in ähnlicher Weise auch bei betrieblichen Rüstprozessen auftreten können.

Um statische Arbeitsanteile im Verlauf des Montageversuchs weitgehend gering zu halten, wurden fünf räumlich verteilte Arbeitsplätze mit unterschiedlichen Arbeitshöhen vorgesehen. Durch diese Anordnung sollen die dynamischen Arbeitshöhen, die ein Maschineneinrichter im Zuge realer Rüstvorgänge einnehmen kann, annähernd wiedergegeben werden. Die Anordnung der Arbeitsplätze und Instruktionen bedingte, dass durch fehlende Einsehbarkeit bestimmte Kombinationen von Anweisung und Montageort nicht möglich waren und dadurch reduziert wurden.

Im Rahmen der Vorversuche wurden die Arbeitshöhen der fünf Arbeitsplätzen aus den jeweiligen Mittelwerten für diverse Körperhöhen, basierend auf dem 50. Perzentil des Mannes (nach DIN 33402-2), entsprechend der berücksichtigten Altersklasse des Probandenkollektivs (21-34 Jahre) bestimmt. Die referenzierten Körperregionen umfassten die Augenhöhe (165 cm), die Schulterhöhe (147 cm), die Ellenbogenhöhe (111 cm), die Schritthöhe (84 cm) und die Tibial- bzw. Schienbeinlänge (46 cm). Die in entsprechenden Höhen angesetzten Tischoberflächen, die als Montagearbeitsfläche dienten, wurden ihrer Größe nach nebeneinander angeordnet.

Der Proband nahm zunächst eine raumzentrale Ausgangsposition ein, bei der er den Blick aus einer entspannten Schachse mit leicht geneigtem Kopf und leicht gesenktem Blick frontal ausrichtet. An dem zu Beginn eingenommenen Arbeitsplatz wurden die für die Montage benötigten Teile in einer Stapelbox bereitgestellt. Im Anschluss erhielt der Proband durch den Versuchsleiter Informationen über die Position der folgenden Montageanweisung. Dazu wurde ihm ein zur eindeutigen Identifizierung der jeweils geforderten horizontalen (links, mittig-links, mittig, mittig-rechts, rechts) und vertikalen (oben, mittig, unten) Position eingesetzter Code mitgeteilt – bspw. „mittig-links-oben“. Der sich an die Informationsweitergabe anschließende Montageprozess durfte dabei aufgrund physischer Auswirkungen nicht mit der Beobachtung der jeweiligen Anweisung zusammenfallen. Zur Abarbeitung der Aufgabe konnte der Blick auf die Montageanweisung und die

entsprechende Montage aber beliebig oft wiederholt werden. Zugunsten einer eindeutigen Differenzierbarkeit der Bewegungsabläufe wurden die Probanden dazu aufgefordert, die Instruktionen für mindestens fünf Sekunden zu beobachten. Nach Fertigstellung eines Montageschrittes sollte der Proband sämtliche Montageteile auf dem Arbeitsplatz ablegen und solange in der zuvor beschriebenen Ausgangsstellung verharren, bis die Messdaten gespeichert werden konnten (i. d. R. fünf bis zehn Sekunden). Im nächsten Schritt wurden sämtliche Arbeitsutensilien zum nächstgelegenen (aus der Perspektive des Probanden rechten) Tisch übertragen. Mithilfe von Klebstreifen wurden Boden- und Tischmarkierungen gesetzt, um einheitliche Arbeitspositionen der Probanden sowie die Tisch-Positionen der mit den zu verbauenden Legosteinen befüllten Stapelbox zu gewährleisten. Des Weiteren sollte die Montage nur auf dem jeweilig genutzten Arbeitstisch erfolgen und nicht etwa freistehend im Raum.

Die Versuchsreihen wurden durch ein dreiköpfiges Team mit einer eindeutigen Aufgabenverteilung überwacht. Während ein Versuchsleiter die Informationen über die Position der nächsten Montageanweisung an den Probanden weitergab und ein Versuchsprotokoll führte, wurde ein weiterer Versuchsleiter mit der Überwachung der Messtechnik und der Einhaltung der geforderten Zeitabstände betraut. Der dritte Versuchsleiter beobachtete den Zusammenbau und griff bei etwaigen Montagefehlern ein, um einen kontinuierlichen Montageprozess aufrecht erhalten zu können. Eine Datensicherung erfolgte nach jedem Durchlauf der Arbeitsplätze, beginnend bei dem Tisch mit der geringsten Höhe bis zum letzten höchstgelegenen Arbeitsplatz. Fehler seitens der Probanden oder Schwierigkeiten innerhalb der Messtechnik konnten bei entsprechender Schwere zum Abbruch des Versuchslaufes führen, sodass die Montage ab dem ersten Arbeitsplatz mit der geringsten Arbeitshöhe erneut ausgeführt werden musste.

Die für den Zusammenbau notwendigen Instruktionen wurden dem Probanden, wie beschrieben, in Papierform oder – im Umgang mit dem HMD – über Hologramme präsentiert. Dazu wurde eine HoloLens-Applikation entwickelt, welche die schriftlichen Anweisungen durch holografische (A4-Format-)Projektionen ersetzt. Die Software visualisierte stets nur die jeweils benötigte bzw. aktuelle Anweisung. Nach Beendigung des Arbeitsschrittes konnte über einen Sprachbefehl („Select“) zur nächsten Montageinstruktion navigiert werden. Der HoloLens-Cursor, der einzig durch Kopfbewegungen gesteuert werden kann, musste für eine erfolgreiche Interaktion auf der zu betrachtenden Montageanweisung ausgerichtet werden. Daher wurden die Probanden dazu angehalten, im Zuge der Versuchsdurchführung ohne Einsatz des HMDs einen vergleichbaren Bewegungsablauf durchzuführen.

Das nach den zuvor beschriebenen Kriterien erstellte Versuchsdesign wurde innerhalb von Vorversuchen entsprechend der Abbildung 7.2 realisiert. Vorversuche haben gezeigt, dass eine Notwendigkeit der Reduktion der Arbeitsplatz- und Schrittzahl im Zuge der Montage der LEGO-Flugzeugvarianten bestand. Bei der gegebenen Versuchsdurchführung ist von einer Netto-Montagezeit von durchschnittlich deutlich über einer Minute für die Bearbeitung eines Montageschrittes auszugehen. Aufgrund der zusätzlichen einzuplanenden Zeiten, wie bspw. die Versuchseinführung für die Probanden oder die Datensicherung durch die Versuchsleitung, wäre die Durchführung des Experiments für einen Probanden an einem einzelnen Tag nicht möglich gewesen. Ein weiteres Kriterium war der zu große Aufwand durch die mit der Datenauswertung verbundene Videoanalyse des Versuchs. Darüber hinaus gestaltete sich auch die Kontrollierbarkeit der Bewegungen des Probandenkollektivs in Verbindung mit der entsprechenden Einhaltung der Vorgaben, wie etwa der Beachtung einer Mindestdauer für eine bestimmte Blickrichtung, schwierig. Daher wurde im Rahmen der Hauptversuche eine weitere Versuchsreihe umgesetzt, die festgelegte (statische) Blickrichtungen vorsieht. Neben der Berücksichtigung weiterer möglicher Blickpositionen bietet sie, aufgrund kontrollierbarer Versuchsbedingungen, zudem den Vorteil einer höheren Reliabilität der Ergebnisse hinsichtlich der verschiedenen Blickpositionen.



Abb. 7.2: Versuchsaufbau des Vorversuchs

Die Versuchsreihe zur **einfachen Montagetätigkeit** eines LEGO-Bausatzes entspricht im Wesentlichen der zuvor beschriebenen Vorgehensweise der Vorversuche. Eine festgelegte Reihenfolge bei der Bearbeitung einer Montageanweisung, die Verhaltensregeln für die Probanden und

die Positionen der Instruktionen wurden übernommen. Die Arbeitsaufgabe wurde bei einer Dauer von rund 30 Minuten jeweils einmal mit und ohne HoloLens durchgeführt.

Eine Reduzierung des Umfangs der Montageaufgabe und der Arbeitsplätze war unabdingbar. So wurde der Zusammenbau auf eine Flugzeugvariante beschränkt. Die Arbeitsplatzanzahl wurde von ursprünglich fünf auf drei Tische reduziert. Die übrig gebliebenen Montagetische umfassten somit die Schulter- (147 cm), Ellenbogen- (111 cm) und Schritthöhe (84 cm). Dabei wurde der zentrale Tisch auf Ellenbogenhöhe zugunsten einer optimalen Arbeitshöhe für jeden Probanden individuell in Bezug auf dessen Körpergröße angepasst (STRASSER, 1993). Eine weitere Ergänzung zu dem bisher genutzten Versuchslayout stellten definierte Arbeitszonen dar, die in Form von Mousepads (28 cm x 20 cm) innerhalb eines Arbeitsplatzes realisiert wurden. Damit konnte eine verbesserte Vergleichbarkeit der Montagetätigkeit zwischen den einzelnen Versuchsteilnehmern generiert werden. Abbildung 7.3 zeigt eine detaillierte Ansicht des modifizierten und nun komplettierten Versuchsaufbaus.



Abb. 7.3: Versuchsaufbau zur Durchführungsart „einfache Montagetätigkeit“

Um variierende Belastungs- und Beanspruchungsphasen während eines Durchlaufes garantieren zu können, wurden die beschriebenen drei Intensitätskategorien berücksichtigt. Tabelle 7.1 können die jeweils eingesetzte Reihenfolge für die jeweiligen Interaktionsmöglichkeiten entnommen werden. Die Reihenfolge hinsichtlich des Einsatzes der HoloLens wechselte nach der Hälfte des Teilnehmerfeldes, um etwaige Auswirkungen in Bezug auf Muskelermüdungserscheinungen

auszuschließen. Während die erste Hälfte des Probandenkollektivs die Versuche ohne Nutzung des HMD begannen, starteten die übrigen Probanden mit der HoloLens. Neben der bereits erwähnten höheren Reliabilität der Daten in Bezug auf die unterschiedlichen Blickpositionen ergibt sich durch die Versuchsreihe „**statische Blickpositionierungen**“ zudem die Möglichkeit, verschiedene Steuerungsmöglichkeiten der Mixed-Reality-Datenbrille im Hinblick auf dadurch entstehende muskuläre (und geistige) Beanspruchungen des Probandenkollektivs zu analysieren. Dazu sollten die Probanden sowohl mit als auch ohne Einsatz des HMDs sprach- und gestenbasierte Interaktionen durchführen. Die Abfolge der einzelnen Blickpositionen wurde randomisiert, um seitens der Probanden keine Lerneffekte zu erzeugen. Die genauen Positionen der einzelnen Montageanweisungen mit entsprechender Kategorie- und Arbeitsplatzzuweisung sind in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tab. 7.1: Reihenfolge der statischen Blickpositionen in Abhängigkeit der Interaktionsart (Sprach- und Gestensteuerung)

Reihenfolge	Sprachsteuerung		Gestensteuerung	
	Position	Intensität	Position	Intensität
1	rechts-unten	schwer	mittig-links-unten	mittel
2	deckenseitig-mittig	schwer	mittig-oben	leicht
3	bodenseitig-links	mittel	mittig-rechts-mittig	mittel
4	links-unten	schwer	rechts-unten	schwer
5	deckenseitig-links	schwer	deckenseitig-links	schwer
6	rechts-oben	schwer	bodenseitig-rechts	mittel
7	links-oben	schwer	rechts-oben	schwer
8	mittig-rechts-unten	leicht	links-oben	schwer
9	mittig-links-unten	mittel	links-unten	schwer
10	bodenseitig-rechts	mittel	mittig-unten	leicht
11	mittig-oben	leicht	rechts-mittig	schwer
12	mittig-mittig	leicht	bodenseitig-links	mittel
13	mittig-rechts-mittig	mittel	mittig-mittig	leicht
14	mittig-rechts-oben	leicht	mittig-rechts-unten	leicht
15	mittig-links-oben	mittel	mittig-rechts-oben	leicht
16	mittig-unten	leicht	mittig-links-mittig	mittel
17	deckenseitig-rechts	schwer	links-mittig	schwer
18	rechts-mittig	schwer	bodenseitig-mittig	schwer
19	mittig-links-mittig	mittel	mittig-links-oben	mittel
20	links-mittig	schwer	deckenseitig-mittig	schwer
21	bodenseitig-mittig	schwer	deckenseitig-rechts	schwer

Tab. 7.2: Kategorienzuweisung der Montageschritte und Arbeitsplätze

Montageanweisung	Arbeitsplatz	Position	Intensität
1	1	rechts-oben	schwer
2	2	mittig-oben	leicht
3	3	mittig-links-oben	mittel
4	1	rechts-mittig	schwer
5	2	mittig-mittig	leicht
6	3	mittig-links-mittig	mittel
7	1	rechts-unten	schwer
8	2	mittig-unten	leicht
9	3	mittig-links-unten	mittel
10	1	mittig-links-oben	leicht
11	2	mittig-links-oben	mittel
12	3	links-oben	schwer
13	1	mittig-links-mittig	leicht
14	2	mittig-links-mittig	mittel
15	3	links-mittig	schwer
16	1	mittig-links-unten	leicht
17	2	mittig-links-unten	mittel
18	3	links-unten	schwer
19	1	mittig-rechts-oben	mittel
20	2	links-oben	schwer
21	3	mittig-rechts-oben	leicht
22	1	mittig-rechts-mittig	mittel
23	2	links-mittig	schwer
24	3	mittig-rechts-mittig	leicht
25	1	mittig-rechts-mittig	mittel
26	2	links-unten	schwer
27	3	mittig-rechts-unten	leicht

Dabei orientierten sich die Positionen grundsätzlich am Aufbau aus der Versuchsreihe „Montage des LEGO-Bausatzes“. Es entfielen jedoch aus kapazitiven Gründen die als „leicht“ eingestuften seitlichen Kopfbewegungen. Innerhalb dieses Versuchsrahmens konnte allerdings auf zusätzliche Decken- und Bodenpositionen mit ca. 55° Abweichung in horizontaler Richtung zurückgegriffen werden. Die mittleren seitlichen Kopfbewegungen erfassten eine Abweichung von ca. 65° , während die schwere bzw. starke horizontale Rotation der Blickrichtung bei ca. 90° verblieb. Insgesamt steuerten die Probanden demnach, um sämtliche mögliche Kopfbewegungen zu provozieren, 21 unterschiedliche, im Raum verteilte Platzhalter an.

Bei den einzelnen Blickpositionen wurden die Montageanweisungen durch weiße Flächen ersetzt bzw. überdeckt. Beim Einsatz des HMDs wurden diese Blätter entsprechend in das Blickfeld des Probanden projiziert. Innerhalb des Versuchs mit Sprachsteuerung kam abermals der Befehl „Next“ zum Einsatz. Die Gestensteuerung wurde durch den Air-tap umgesetzt.

Die Arbeitsabfolge innerhalb dieser Versuchsreihe gestaltete sich dabei nach dem folgenden Muster: Der Proband nahm die bereits im ersten Versuchsabschnitt beschriebene Ausgangsstellung an einer definierten Markierung mittig im Raum ein. Während dieser Position erhielt er von einem der Versuchsleiter den Standort der nächsten Blickrichtung. Nachdem zehn Sekunden in dieser Position verstrichen waren, erhielt er die Anweisung der sprach- (**Versuchsreihe IIa**) oder gestenbasierten (**Versuchsreihe IIb**) Interaktion zur Bestätigung des nächsten Schrittes bzw. der nächsten Blickposition. Hierfür wurden weitere fünf Sekunden veranschlagt. Die Blickzeiten wurden durch den jeweilig zuständigen Versuchsleiter kontrolliert und dem Probanden bei Erreichen mitgeteilt. Nach dem Abschluss der beobachteten Blickposition kehrte der Proband wieder in die Ausgangsstellung zurück und wartete auf die nachfolgende Ansage der nächsten Blickposition. Pro Durchgang benötigten die Probanden ca. 10 Minuten, wobei jeweils zwei Durchläufe ohne und mit Nutzung der Datenbrille absolviert wurden. Letzteres erfolgte jeweils einmal unter Anwendung der Sprachsteuerung und der Gestensteuerung der HoloLens.

Wie bei der vorherigen Versuchsreihe wechselte die Reihenfolge bei der Untersuchung bezüglich der Anwendung des HMDs ab der zweiten Hälfte des untersuchten Probandenkollektivs. Des Weiteren wurden die Arbeitsplätze mit den verschiedenen Arbeitshöhen aus dem Versuchsraum entfernt, um das größtmögliche Spektrum untersuchbarer Blickpositionen zu gewährleisten. Diese Modifizierung ist auch in Abbildung 7.4 ersichtlich, die in einer Gesamtdarstellung den kompletten Aufbau dieser Versuchsreihe verdeutlicht. Die Probanden führten die Aufgabe in einer zentralen Raumposition aus.

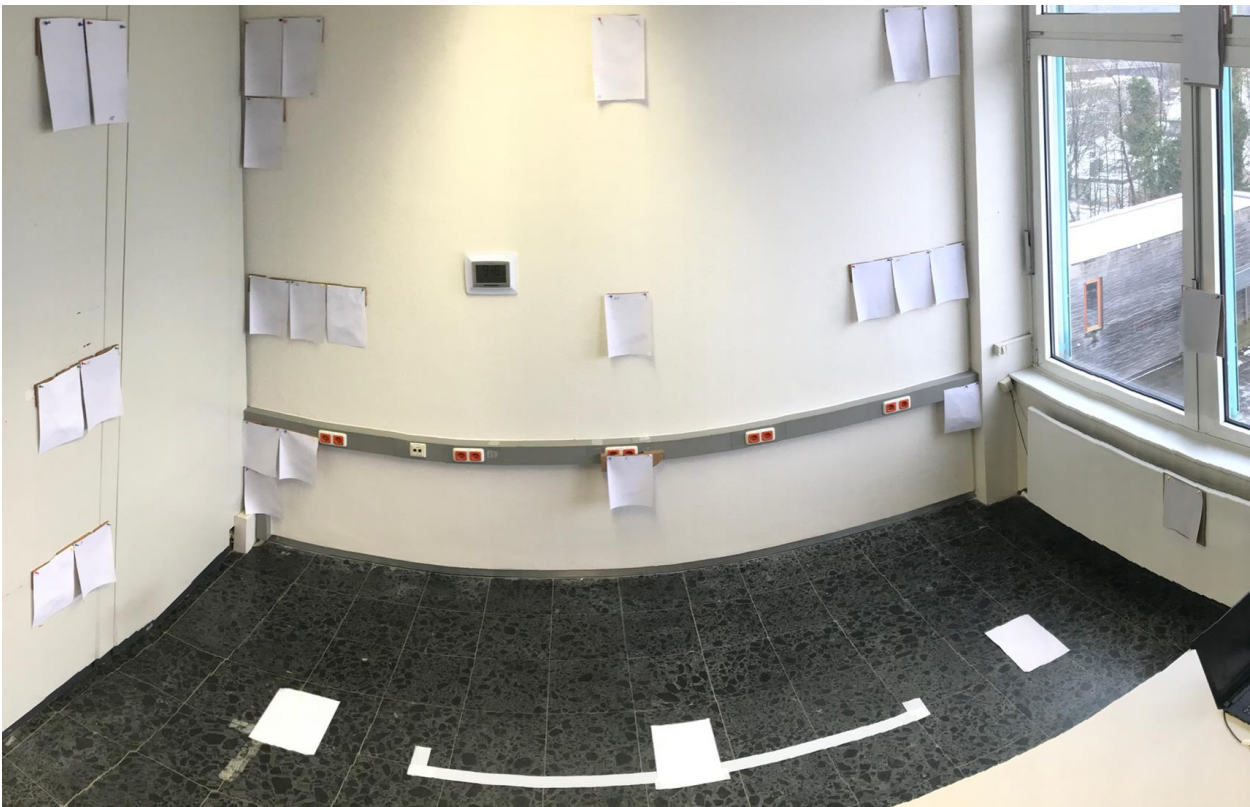


Abb. 7.4: Versuchsaufbau der Durchführungsart „statische Blickpositionierungen“

Der Versuchsablauf (siehe Tab. 7.3) begann mit einer Einweisung der Probanden, innerhalb derer ihnen neben einer Einführung in den thematischen Hintergrund ebenfalls die einzuhaltenden Regeln und Risiken sowie das zu nutzende Endgerät nähergebracht wurden. Zunächst füllten sie einen ersten Teil der Fragebögen aus. Anschließend erfolgte die Elektrodenapplizierung, wobei hier die empfohlenen Vorbereitungsmaßnahmen zur Erhöhung der Signalqualität befolgt wurden. Anschließend erfolgte eine Überprüfung der Messkette, um daraufhin mit der Ruhemessung eine erste Referenzmessung zur elektromyographischen Aktivität durchzuführen. Den Abschluss der Vorbereitung bildete das Einüben des Ablaufs der folgenden Versuchsaufgaben. Die insgesamt drei Versuchsphasen (Montagetätigkeit sowie Blickpositionierungen mit Sprach- und Gestensteuerung) wurden zweimal, d. h. jeweils mit und ohne HMD durchgeführt (siehe Abb. 7.5).

Nach Beendigung einer Versuchsdurchführung wurde zunächst der Kopfbereich des Probanden mithilfe einer Wärmebildkamera fotografiert. Anschließend bearbeiteten die Probanden Fragebögen. Schließlich konnten sie in einer 15-minütigen Erholungsphase regenerieren, damit etwaigen Ermüdungseffekten vorgebeugt werden konnte. Abschließend wurden die Maximalkraftmessungen zur Normierung der elektromyographischen Aktivität und die Abarbeitung des letzten Fragebogensatzes durchgeführt.

Tab. 7.3: Chronologischer Versuchsablauf der „HoloErgo“-Studie (Teilstudie 1)

Phase	Dauer [min]	Inhalt	Durchführung	
			Papierinstruktion	HoloLens
Vorbereitung	45	Einweisung des Probanden	1x	
		Ausfüllen von Fragebögen		
		Elektrodenapplizierung		
		Überprüfung der Messtechnik		
		Ruhemessung		
		Einüben der Aufgabe und der Interaktion mit der HoloLens		
Versuchsreihe I	30	Montagetätigkeit	1x	1x
	5	Aufnahme der Wärmebilder		
	5	Ausfüllen von Fragebögen		
	15	Erholung		
Versuchsreihe IIa	15	Blickpositionierungen (<i>Sprachsteuerung</i>)	1x	1x
	5	Aufnahme der Wärmebilder		
	5	Ausfüllen von Fragebögen		
	15	Erholung		
Versuchsreihe IIb	15	Blickpositionierungen (<i>Gestensteuerung</i>)	1x	1x
	5	Aufnahme der Wärmebilder		
	5	Ausfüllen von Fragebögen		
	15	Erholung		
Abschluss	30	Maximalkraftmessungen	1x	
	15	Ausfüllen von Fragebögen und abschließendes Interview		

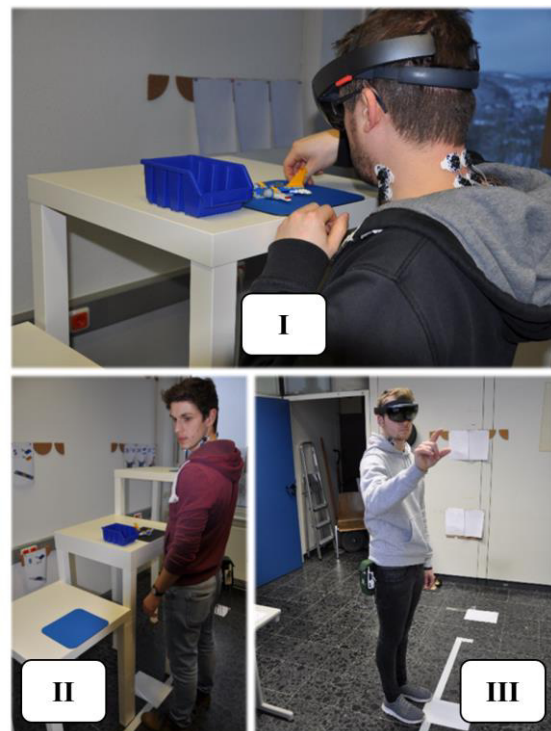
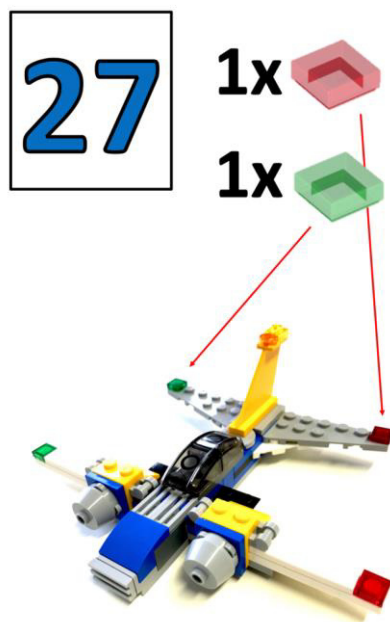


Abb. 7.5: Symbolhafte Darstellung einer Montageanleitung (modifiziert nach N.N., 2015) und der unterschiedlichen Versuchsphasen (I: Montage mithilfe der HoloLens; II: Montage ohne Nutzung der HoloLens; III: statische Blickpositionierungen bei gestensteuerter Anwendung der HoloLens)

7.1.3 Teilstudie 2 („HoloErgo 2.0“)

Um aufbauend auf den Untersuchungen der ersten Teilstudie auch dynamische und realitätsnahe Bewegungsabläufe zu evaluieren, bestand in der zweiten Teilstudie „HoloErgo 2.0“ die Aufgabe in der mechanischen Einrichtung einer Rotationszugbiegemaschine des Typs „RBV35“ der

Firma Wafios. Die experimentelle Studie wurde in einem industrienahen Labor durchgeführt. Untersuchungsgegenstand war, wie in Teilstudie 1, die Microsoft® HoloLens. Mithilfe einer prototypischen HoloLens-Applikation können Montage- oder Rüstinstruktionen in Form von text-, bild- und videobasierten Inhalten sowie 3D-Animationen holografisch visualisiert werden. Die HoloLens-Anwendung teilte sich in zwei Modi auf: die Durchführung des Rüstvorgangs mit der **HoloLens im fixierten Fenstermodus (1)** sowie mit der **HoloLens im variablen Fenstermodus (2)**. Während ersterer die Instruktionen örtlich bindet bzw. auf einer Position fixiert, folgen die Instruktionen im variablen Fenstermodus dem Blickfeld des Nutzers. Der Proband interagiert mit der HoloLens respektive der Applikation ausschließlich gestengesteuert, um Inhalte einzusehen oder zwischen den Rüstschritten wechseln zu können. Die zwar unter Laborbedingungen ausgerichtete, aber realitätsbestrebende Versuchsumgebung implizierte, dass Umgebungsbedingungen, wie industriebedingter Lärm, die Arbeitssicherheit sowie die Funktion bzw. Interaktion mit dem Gerät nicht beeinträchtigen dürfen. Demnach wurde die sprachliche Interaktion mit der HoloLens, die in der ersten Teilstudie noch herangezogen wurde, innerhalb dieser Studie nicht genutzt, um eine praxisnahe Untersuchung gewährleisten zu können. Die Rüstdurchgänge ohne Nutzung der HoloLens erfolgten anhand einer örtlich gebundenen **Papierinstruktion (3)**, die, mit Ausnahme der holografischen 3D-Animationen und Videos, denselben Informationsgehalt wie das Unterstützungssystem aufwies (siehe Abb. A10-A15, Anhang A).

Innerhalb der Maschinenhalle, in der die Versuche absolviert wurden, konnten, um mögliche Störeinflüsse zu minimieren, gemäß den Empfehlungen der Arbeitsstättenrichtlinien (ASR A3.4 und A3.5) weitgehend gleichmäßige Luftverhältnisse (Temperatur: 18 bis 21 °C, Luftfeuchtigkeit: 35 bis 50 %, Windgeschwindigkeit: < 0,1 m/s) sowie eine geringfügige Schallimmission (ca. 50 dB(A)) gewährleistet werden. Einzig der Beleuchtungseinfluss konnte witterungsbedingt ca. zwischen 700 lx und 3.000 lx variieren. Die Versuchsleitung, bestehend aus einem wissenschaftlichen Mitarbeiter und zwei studentischen Hilfskräften, kontrollierten vor Ankunft der Probanden zunächst die gesamte Versuchsinfrastruktur, d. h. die Einhaltung der beschriebenen Umgebungsbedingungen und das Vorliegen der Versuchsmaterialien. Diese umfassten ein Versuchsprotokoll, Fragebögen, eine Funkuhr, Messgeräte (OEMG-Messgerät, Wärmebildkamera und 3D-Kamera), Verbrauchsmaterialien, wie Oberflächenelektroden, Desinfektionsmittel, Tücher, Stifte etc. sowie zwei Notebooks zur Anwendung der Messtechnik-Software und zur Protokollierung des Versuchsablaufs. Durch den Einsatz von zwei Videokameras konnten zudem unterschiedliche Perspektiven eingenommen werden, um die messtechnisch erfassten Bewegungen der Probanden im Zuge einer Videoanalyse eindeutig abgleichen und differenzieren zu können.

Der Versuchsaufbau gestaltete sich wie folgt: Die zu montierenden Werkzeuge und Montagehilfsmittel wurden zu Versuchsbeginn auf einem Beistelltisch in zwei Kleinladungsträgern (KLT) bereitgestellt. Die Oberfläche eines zweiten Tisches wurde für ein Shadowboard genutzt, auf dem sämtliche Rüst-Utensilien von dem KLT auf die jeweilige Soll-Position umgelagert werden sollten. Ein dritter Beistelltisch diente als ortsgebundene Ablagefläche für die Papierinstruktion. Sämtliche Beistelltische wiesen identische Abmaße auf (75 cm x 75 cm x 85 cm). Das Versuchssetting sowie die Anordnung der Rotationszugbiegemaschine, der Werkzeuge und Hilfsmittel, der Tische, der Rüstinstruktionen und der Ausgangsposition des Probanden kann Abbildung 7.6 entnommen werden. Eine über dem Montageraum der Maschine angebrachte 3D-Kamera zeichnete die Montageposition der Werkzeuge in Echtzeit auf. Der Proband erhielt weder nach jedem Schritt noch nach dem gesamten Rüstprozess Feedback zur richtigen (oder falschen) Positionierung der jeweiligen Werkzeuge, um innerhalb des Probandenkollektivs keine Verzerrung des erbrachten Leistungsspektrums zu erhalten.

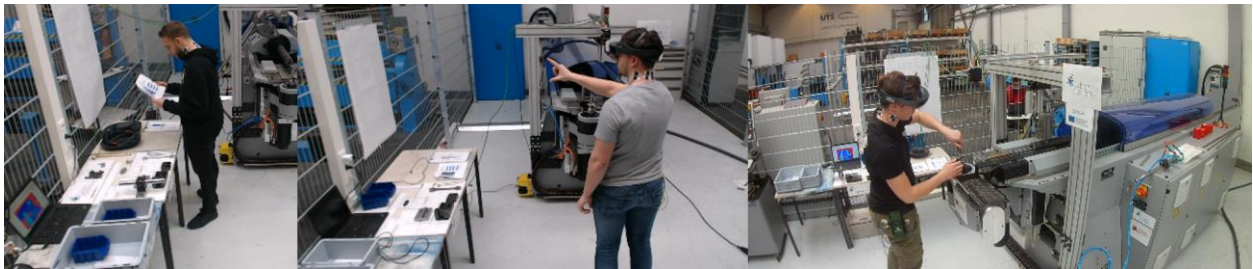


Abb. 7.6: Probanden während der Durchführung des Rüstvorgangs mithilfe der Papierinstruktion (links) und bei der Nutzung der HoloLens (mittig und rechts)

Neben der objektiven Erfassung von Leistungsindikatoren, d. h. der Rüstzeit und etwaiger Prozess- oder Montagefehler, wurden, wie in der ersten Teilstudie, mithilfe der OEMG sowie anhand von thermografischen Bildern physische Beanspruchungen der Schulter-Nacken-Muskulatur und des Kopfbereiches evaluiert. Ergänzend dazu wurden erneut standardisierte Fragebögen zur physischen und mentalen Empfindung sowie ein teilstrukturiertes Interview ausgegeben, die neben den subjektiven Empfindungen auch die Vorerfahrungen mit dem Prozess und vergleichbaren technischen Geräten, die Technikaffinität sowie das persönliche Feedback der Probanden zum Umgang mit der Datenbrille erfassten – u. a. in Bezug auf die Usability bzw. die optimale Bedienbarkeit des interaktiven Tools.

Die Aufgaben der Versuchsleitung teilten sich in die Interaktion mit dem Probanden (prozessuale und technische Einweisung sowie Begleitung während der gesamten Versuchsdauer, Ausfüllen der Fragebögen, Applizieren der Messtechnik etc.), die Bedienung der Messtechnik und Sicherung der Daten sowie das Protokollieren des Versuchsablaufs mitsamt der Festhaltung der Leistungsindikatoren und weiterer Auffälligkeiten auf.

Die beschriebenen drei Versuchsvarianten wurden in zwei Versuchsabschnitten, d. h. also in zweifacher Ausführung, absolviert, sodass insgesamt sechs Rüstprozesse pro Proband durchgeführt werden mussten. Um in dem Ausführungsmuster Wechselwirkungen der drei Varianten untereinander auszuschließen, wurden definierte Muster in der Abfolge der Varianten für jeden Probanden randomisiert festgelegt, sodass die Probanden sechs unterschiedlichen Variantenabfolgen zugeordnet wurden.

Um der Beurteilung der Grundsätze zur Dialoggestaltung (vgl. DIN EN ISO 9241-110, 2020), u. a. hinsichtlich der Aufgabenangemessenheit, Lernförderlichkeit und Selbstbeschreibungsfähigkeit, bestmöglich Folge zu leisten, wurde die Versuchsdurchführung unter Anwendung der HoloLens mithilfe der beschriebenen zwei unterschiedlichen Modi durchgeführt. Damit wurde auf die im vorliegenden Kontext bestehende individuelle und selbstbestimmte Prozessdynamik abgezielt. Zum einen konnte dadurch die Interaktion „traditioneller“ Umstände, wie der Handhabung mit einer lokal fixierten Papierinstruktion, einer holografischen fixierten Unterstützung gegenübergestellt werden. Zum anderen können die „statischen“ Montageanleitungen mit der dynamischen bzw. dem Blickfeld des Nutzers folgenden Interfaces der HoloLens verglichen werden. In diesem Zusammenhang sind etwaige statistische Limitierungen, die durch die hohe (und realitätsnahe) Variantenanzahl und dem kleinen Probandenkollektiv entstehen, zu berücksichtigen. Die Coronapandemie hat insbesondere dazu beigetragen, dass die Untersuchung einer größeren Gruppe von Teilnehmern nicht möglich war.

Der Versuchsablauf ist in Tabelle 7.4 dargestellt. Dieser begann zunächst mit einer rund 60-minütigen Vorbereitungsphase. Diese beinhaltete die Einweisung der Probanden hinsichtlich der Aufgabe und der eingesetzten Technologie. Nachdem die Probanden die Erhebung und Verarbeitung ihrer personenbezogenen Daten einwilligten, wurden nach dem Ausfüllen einleitender Fragebögen Oberflächenelektroden auf die zu untersuchenden Muskelstellen appliziert und mit dem Messsystem verbunden. Im Anschluss an die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Messtechnik wurde eine erste Referenzmessung (Ruhemessung) durchgeführt.

Der Proband nahm vor respektive nach der Durchführung eines Arbeitsschrittes stets eine festgelegte und zur Orientierung des Probanden mit einem Marker versehene Start- oder Endposition ein (siehe Abb. 7.6, Mitte). Die Messaufzeichnungen begannen mit dem von der Versuchsleitung ausgegebenen Startsignal und endeten nach einem Rüstschritt bzw. der Positionierung des Probanden in der Ausgangsstellung. In dem Versuchsraum hielt sich der Proband während der gesamten Versuchsdauer allein auf, um Ablenkungen von der Arbeitsaufgabe auszuschließen. Nur in Sonderfällen, z. B. Störung der Messtechnik, Unwohlsein des Probanden etc., wurde die Messung unterbrochen und zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt.

Tab. 7.4: Chronologischer Versuchsablauf der „HoloErgo 2.0“-Studie (Teilstudie 2)

Phase	Dauer [min]	Inhalt	Durchführung		
			Papierinstruktion	HoloLens - fixierter Fenstermodus	HoloLens - variabler Fenstermodus
Vorbereitung	45	Einweisung des Probanden		1x	
		Ausfüllen von Fragebögen			
		Elektrodenapplizierung			
		Überprüfung der Messtechnik			
		Ruhemessung			
		Einüben der Aufgabe und der Interaktion mit der HoloLens			
Versuchsreihe	15-45	Rüstvorgang	2x	2x	2x
	5	Aufnahme der Wärmebilder			
	5	Ausfüllen von Fragebögen			
	15	Erholung			
Abschluss	30	Maximalkraftmessungen		1x	
	15	Ausfüllen von Fragebögen und abschließendes Interview			

Der Rüstprozess wurde auf 12 Arbeitsschritte begrenzt (siehe Abb. 7.7), um die Komplexität und Dauer des Versuchs in einem für die Probanden erträglichen Maß zu halten. Nichtsdestotrotz wurde ein Rüstvorgang durchgeführt, der aufgrund typischer rüstspezifischer Montagevorgänge einen praxisnahen Ausschnitt eines Rüstvorgangs einer Rotationszugbiegemaschine darstellt. Vor dem eigentlichen Rüstvorgang wurden die Probanden zur logistischen Bereitstellung der vorhandenen Werkzeuge und Montagehilfsmittel angehalten. Dazu „verräumten“ diese die sich in den KLTs befindlichen Materialien auf die dafür vorgesehenen definierten Stellplätze des Shadowboards, die durch Umrissmarkierungen gekennzeichnet waren. Auf die Ausführung des Logistikschritts (*L*) folgten elf Rüstschritte (*R*), deren Abfolge sich an die in Kapitel 2 beschriebene Werkzeuganordnung anlehnte und nur durch maschinenspezifische oder unterstützende Werkzeugelemente ergänzt wurde. Die Montage der einzelnen Werkzeuge erfolgte durch Schraub- oder Steckverbindungen sowie unter etwaiger Zuhilfenahme von Montagehilfsmitteln und Normteilen. Somit variierte der Komplexitätsgrad der einzelnen Arbeitsschritte.

Der Biegedorn wird per Hand in die Dornstange eingeschraubt, um diesen im Anschluss mit einem 22mm-Schraubenschlüssel festzuziehen. Für die Montage der inneren Spannbacke und das Einsetzen der Biegeform sind zunächst das Einstecken eines Passfederrings in die Nut der Achsenplatte der Maschine und das händische Einschrauben des Gewindeinsatzes für die Biegeachse erforderlich. Ersteres wird unter Verwendung von zwei M6x60-Edelstahlschrauben nach DIN EN ISO 4762 (2004) mit einem 5mm-Innensechskantschlüssel verschraubt. Im Folgenden wird zunächst der Bolzen (als Aufsatz für eine etwaige zweite Biegeebene) in den Gewindeinsatz handfest eingeschraubt, um anschließend den Faltenglätter in die linke Aufnahme der Führungsplatte der Maschine zu setzen. Für den Einbau der äußeren Spannbacke, der aus kapazitiven Gründen kein Bestandteil des Rüstvorgangs war, erfolgt zunächst die Montage des Schiebers, der auf die Passfeder des Biegekopfes gesetzt und mithilfe eines 8mm-Innensechskantschlüssels und vier Edelstahlschrauben (M10x50) inklusive vier Unterlegscheiben verschraubt wird. Die Nut der mag-

netischen Platte zur Klemmkraftübertragung wird an den Schieber angelegt und fungiert als „Puffer“ zur Platte zur Höhenverstellung, die ebenfalls auf die Passfeder des Biegekopfes zu setzen ist. Abschließend erfolgte die Montage des Klemmbocks auf der Platte zur Höhenverstellung unter erneuter Zuhilfenahme des 8mm-Innensechskantschlüssels. Die Schraubverbindung wird durch vier M10x80-Edelstahlschrauben (mitsamt vier Unterlegscheiben) hergestellt.

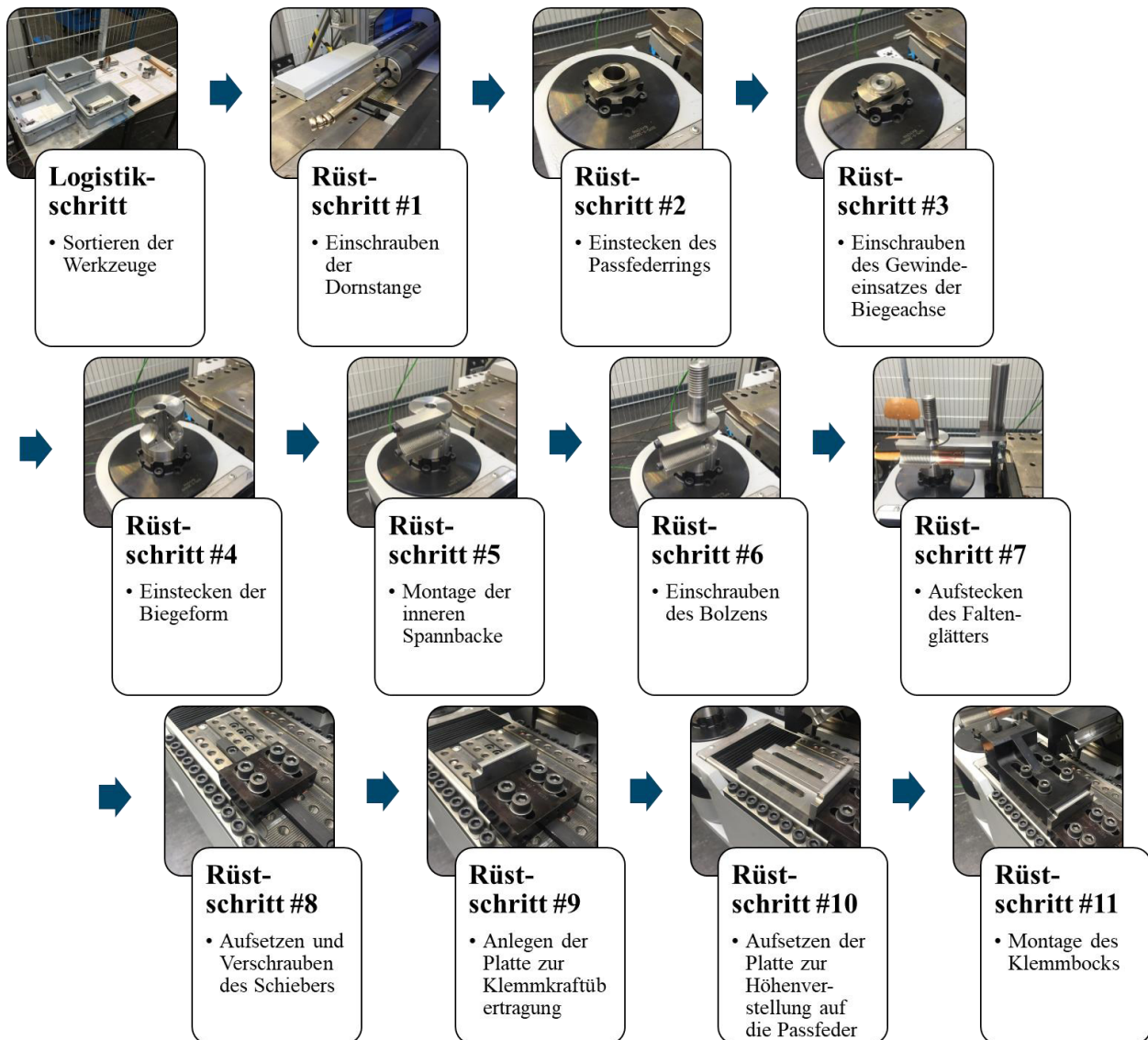


Abb. 7.7: Arbeitsschritte im Zuge des Rüstvorgangs

Zwischen den Versuchsdurchführungen wurde eine 15-minütige Pause abgehalten, um mögliche Ermüdungserscheinungen nicht zu provozieren. Neben dem Ausfüllen weiterer Fragebögen wurden außerdem thermografische Bilder des Kopfbereichs aufgenommen. Nach jedem Rüstvorgang erfasste die Versuchsleitung die Durchführungszeit sowie etwaige Prozessfehler, die hinsichtlich der Montageposition und -ausrichtung der Werkzeuge außerdem durch die 3D-Kamera

objektiv nachgewiesen bzw. überprüft wurden. Im Anschluss an die insgesamt sechs Durchführungen, die pro Versuch rund 40 Minuten andauerten, erfolgten weitere Referenzmessungen (Maximalkraftmessungen) und abschließende Befragungen. Je nach Durchführungsgeschwindigkeit der Probanden variierte die Versuchsdauer, die allerdings durchschnittlich ca. 6,5 Stunden betrug.

Die prozessuale Abfolge eines Arbeitsschritts während der Versuchsdurchführung war wie folgt vorgegeben: Nach dem Startsignal, das die Versuchsleitung gab, sollte die Rüstinstruktion mindestens einmal verbindlich eingesehen werden, bevor die Arbeitsaufgabe begonnen werden konnte. Bei Nutzung der Papierinstruktion bewegte sich der Proband zu dem Beistelltisch, auf dem die papierförmige Montageanweisung auslag. Analog dazu musste der Proband bei Anwendung der HoloLens im fixierten Fenstermodus denselben Laufweg absolvieren. Die holografische Montageanleitung konnte in einer Höhe von ca. 80 cm über der Tischoberfläche eingesehen werden. Im variablen Fenstermodus der HoloLens hingegen folgte die Rüstinstruktion dem Blickfeld des Nutzers, sodass bei dieser Variante der entsprechende Laufweg für die Probanden entfällt. Die Rüstapplikation der HoloLens beinhaltete neben bildbasierten und textlichen Informationen zudem eine Videosequenz zu jedem Rüstschritt. Die Montageinstruktionen durften im Laufe des Arbeitsprozesses beliebig oft betrachtet werden.

7.1.4 *Probandenkollektiv*

Für die empirische **Feldstudie** konnten insgesamt 25 Arbeitnehmer aus fünf verschiedenen KMUs (hier: Unternehmen A-E) im Alter zwischen 20 und 60 Jahren gewonnen werden (siehe Tab. 7.5). Alle Unternehmen waren mittelständisch und stellten über Biege- bzw. Tiefziehprozesse Kaltumformteile her. Die Teilnehmer hatten differente Positionen im Unternehmen inne, d. h. Konstruktionsingenieur, Maschineneinrichter, Meister oder Vorarbeiter, Produktdesigner, Produktionsingenieur, Prozessmanager, Qualitätsingenieur oder Technischer Vertriebsmitarbeiter, kamen aus unterschiedlichen Bildungsschichten (fachspezifischer oder fachfremder Qualifizierung in Form eines akademischen Grads, einer Ausbildung oder einer Meisterschule) und wiesen verschiedene Berufslaufzeiten von mehr oder weniger als 10 Jahre auf. Somit konnte eine differenzierte Untersuchung zur Gestaltung der erforderlichen Technologie für ein breites Spektrum von Endnutzern realisiert werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass aus datenschutzrechtlichen Gründen und auf Wunsch der beteiligten Unternehmen keine weiteren detaillierten, personenbezogenen Daten veröffentlicht werden dürfen. Einige Teilnehmer, die in den betrachteten Unternehmen u. a. als Vorarbeiter bzw. Maschineneinrichter fungierten, nahmen zudem an Usability-Tests teil, damit sie dadurch weiterhin sowohl in den Designprozess als auch in die praxisnahe **Evaluierung** eingebunden waren. Insgesamt wurden 15 Probanden mit unterschiedlichen fachlichen Hintergründen und Erfahrungswerten (zwischen 3 und 40 Jahren Betriebszugehörigkeit) in

die Evaluierungsphase einbezogen (siehe Tab. 7.6). Acht Teilnehmer beschäftigten sich mit dem Szenario „Schreiben“ und zehn Teilnehmer mit dem Szenario „Lesen“ oder „Konfiguration“. Dabei wurden vier KMU aus zwei europäischen Ländern (hier: W-Z) einbezogen.

Sowohl für **Teilstudie 1** als auch für **Teilstudie 2** waren die Versuchspersonen inhaltlich mit dem Prozess und/oder der verwendeten Technologie weitgehend vertraut. Die Auswahl erfolgte nach den Strategien des „Convenient Sampling“ und des „Purposive Sampling“ (vgl. BRYMAN, 2008). Erstere sieht die Auswahl von Teilnehmern vor, die leicht zugänglich sind. Letztere wählt Probanden, die einem bestimmten Zweck dienen könnten, in diesem Fall der Kommentierung der Benutzerfreundlichkeit des Systems und seines Potenzials zur Unterstützung des jeweiligen Prozesses. Den involvierten Probanden wurden grundlegende Fragen zu allgemeinen personenbezogenen und charakteristischen Angaben, wie Alter, Körpergröße, Gewicht, Beruf, Händigkeit und der Nutzung einer etwaigen Sehhilfe, sowie zur körperlichen Verfassung gestellt. Letzteres umfasst neben Fragestellungen zu Vorerkrankungen oder gesundheitlichen Beschwerden und der subjektiv empfundenen emotionalen Verfassung vor Versuchsbeginn insbesondere Fragestellungen zum Freizeitverhalten der Probanden hinsichtlich der Ausübung sportlicher Aktivitäten oder des Konsums von Alkohol und Nikotin. Diese Daten wurden aufgrund des geforderten guten Gesundheits- und Trainingszustands erhoben, da sie das Verletzungs- bzw. Gesundheitsrisiko für das Probandenkollektiv nicht zuletzt durch die Anwendung der MVC-Methode minimieren sollten. Weiterhin gaben die Probanden Vorerfahrungen mit unterschiedlichen digitalen Endgeräten an, wie Notebooks, Tablets, Smartphones oder Datenbrillen. Durch die in der zweiten Teilstudie im Vergleich zur ersten Studie verstärkte Interaktion mit der HoloLens, wurde zusätzlich die Einstellung zu und der Umgang mit elektronischen Geräten anhand eines Technikaffinität-Fragebogens (TA-EG, vgl. KARRER et al., 2009) erfragt. Weiterhin wurden die Probanden zu bisherigen Rüstprozesserfahrungen befragt. Der TA-EG-Fragebogen (siehe Abb. C28-C29, Anhang C) bewertet 19 unterschiedliche Statements zu verschiedenen elektronischen Geräten, d. h. Computer, Smartphones, Navigationssysteme etc., die vier Subskalen abdecken: Begeisterung für Technik (z. B. „Es macht mir Spaß, ein elektronisches Gerät auszuprobieren.“), Kompetenz im Umgang mit Technik (z. B. „Ich kenne mich im Bereich elektronischer Geräte aus.“) sowie negative (z. B. „Elektronische Geräte verursachen Stress.“) und positive Technikfolgen (z. B. „Elektronische Geräte erleichtern mir den Alltag.“). Die Antwortmöglichkeiten basieren auf einer fünf-stufigen Likert-Skala, deren Bewertungsmerkmale sich von „trifft gar nicht zu“ (1) über „teils/teils“ (3) bis „trifft voll zu“ (5) erstrecken.

Tab. 7.5: Teilnehmer der empirischen Feldstudie

Teilnehmer (TN)	Interview	Beobachtung		Design-Workshops	Tätigkeit	Unternehmen	fachliche Qualifizierung (fachspezifisch: fs; fachfremd: ff)	Betriebszugehörigkeit
		Eye-Tracking	Shadowing					
TN1	X			X	Meister / Vorarbeiter	A	akademischer Grad (ff)	> 10 Jahre
TN2	X				Produktdesigner	A	Meisterschule (fs)	> 10 Jahre
TN3	X				Meister / Vorarbeiter	A	Meisterschule (fs)	> 10 Jahre
TN4	X			X	Produktionsingenieur	A	akademischer Grad (ff)	> 10 Jahre
TN5	X	X			Maschineneinrichter	A	Meisterschule (fs)	< 10 Jahre
TN6	X	X		X	Maschineneinrichter	A	Meisterschule (fs)	< 10 Jahre
TN7	X	X	X	X	Maschineneinrichter	A	Ausbildung (fs)	> 10 Jahre
TN8	X	X	X	X	Maschineneinrichter	B	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN9	X	X		X	Maschineneinrichter	B	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN10	X	X		X	Maschineneinrichter	B	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN11	X	X	X	X	Meister / Vorarbeiter	B	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN12	X			X	Prozessingenieur	B	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN13	X			X	Meister / Vorarbeiter	B	Meisterschule (fs)	> 10 Jahre
TN14	X				Technischer Vertrieb	B	akademischer Grad (fs)	> 10 Jahre
TN15	X				Technischer Vertrieb	B	Meisterschule (fs)	> 10 Jahre
TN16	X				Konstruktionsingenieur	B	akademischer Grad (fs)	> 10 Jahre
TN17	X				Technischer Vertrieb	B	akademischer Grad (fs)	> 10 Jahre
TN18	X				Produktionsingenieur	B	akademischer Grad (fs)	> 10 Jahre
TN19	X				Qualitätsingenieur	B	akademischer Grad (fs)	< 10 Jahre
TN20	X	X	X	X	Meister / Vorarbeiter	C	Ausbildung (fs)	> 10 Jahre
TN21				X	Maschineneinrichter	C	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN22	X	X			Maschineneinrichter	D	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN23	X	X			Meister / Vorarbeiter	D	Meisterschule (fs)	> 10 Jahre
TN24	X	X			Maschineneinrichter	E	Ausbildung (fs)	< 10 Jahre
TN25	X				Produktionsingenieur	E	akademischer Grad (fs)	> 10 Jahre

Tab. 7.6: Teilnehmer der Evaluierung

Teilnehmer (TN)	Tätigkeit	Unternehmen	Maschine / Prozess	Anzahl der Rüstschritte	Durchführung und Dauer der Evaluierung	
					"Schreiben"	"Lesen" und "Konfiguration"
TN26	Maschineneinrichter	W	Biegemaschinen für kleine Rohrdurchmesser	12-24	X	2 Stunden
TN27	Meister / Vorarbeiter				X	
TN28	Produktionsingenieur					
TN29	Meister / Vorarbeiter				X	
TN30	Maschineneinrichter	X	Biegemaschinen für große Rohrdurchmesser	12	X	7 Stunden
TN31	Maschineneinrichter				X	
TN32	Maschineneinrichter				X	
TN33	Maschineneinrichter				X	
TN34	Maschineneinrichter	Y	Spezialmaschine zur Herstellung von flexiblen Metallschläuchern	> 90	X	4 Stunden
TN35	Meister / Vorarbeiter	Z	Presse zum Stanzen von Metallbändern	12		3 Stunden
TN36	Maschineneinrichter					
TN37	Maschineneinrichter					
TN38	Produktionsingenieur					
TN39	Produktionsleiter				X	
TN40	Entwicklungsleiter				X	

In der **ersten Teilstudie „HoloErgo“** wurden männliche, junge, sportliche und Männer ohne schwerwiegende Vorerkrankungen in die Untersuchung einbezogen (siehe Tab. 7.7 und 7.8).

Tab. 7.7: Spezifische Angaben zu den 12 männlichen Probanden der ersten Teilstudie „HoloErgo“ (Teil 1 von 2)

Versuchsperson (VP)	Alter [Jahre]	Größe [m]	Masse [kg]	BMI [-]	Sport [h/Woche]
VP01	23	1,83	85	23,22	10
VP02	28	1,87	85	22,73	7,5
VP03	30	1,92	96	25,00	9
VP04	26	1,86	85	22,85	10
VP05	26	1,82	72	19,78	7,5
VP06	26	1,83	81	22,13	8
VP07	21	1,83	73	19,95	8
VP08	23	1,86	74	19,89	15
VP09	30	1,8	87	24,17	6
VP10	25	1,9	86	22,63	6
VP11	33	1,82	86	23,63	2,5
VP12	24	1,82	80	21,98	8
M ± SD	26,3 ± 3,5	1,85 ± 0,04	82,5 ± 6,9	22,33 ± 1,70	8,1 ± 3,0

Tab. 7.8: Spezifische Angaben zu den 12 männlichen Probanden der ersten Teilstudie „HoloErgo“ (Teil 2 von 2)

Versuchsperson (VP)	Vorerfahrungen Datenbrillen	Zigaretten [Stk./Tag]	Alkohol [x/Woche]
VP01	nein	0	regelmäßig
VP02	ja (HoloLens)	0	regelmäßig
VP03	nein	0	selten
VP04	nein	< 20	regelmäßig
VP05	nein	0	regelmäßig
VP06	nein	0	regelmäßig
VP07	ja (Samsung Gear)	0	selten
VP08	nein	0	selten
VP09	nein	0	selten
VP10	nein	0	selten
VP11	ja (HoloLens)	0	selten
VP12	nein	0	selten

Diese Zielgruppe wurde gewählt, da auftretende physische und psychische Auswirkungen durch die Nutzung der HoloLens bei einem davon abweichenden Personenkreis mindestens zu ähnlich starken Effekten kommen könnte. Die Homogenität des Teilnehmerfeldes wurde außerdem dadurch gewährleistet, dass ausschließlich Rechtshänder ausgewählt wurden, die darüber hinaus keine Sehhilfen verwendeten.

Das Durchschnittsalter der 12 männlichen Probanden betrug 26,25 Jahre ($\pm 3,47$ Jahre). Auf Grundlage der angegebenen Körperdaten konnte für sämtliche Probanden der Body-Mass-Index (BMI) berechnet werden (siehe Formel 7.1):

$$BMI = \frac{\text{Körpermasse [kg]}}{\text{Körpergröße}^2[\text{m}]} \quad (7.1)$$

Der BMI gilt als Maßzahl für die Bewertung des Körpergewichts. Während die Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. (DGE) eine Klassifizierung des BMI nach Geschlecht vorgenommen hat, entwickelte das amerikanische National Research Council (NRC) eine altersbezogene Einteilung des BMI (siehe Tab. 7.9).

Tab. 7.9: Geschlechts- (links, nach DGE, 1992) und altersspezifische „normalgewichtige“ Klassifizierung (rechts, nach NRC, 1989) des BMI

Klassifikation	BMI		Alter [Jahre]	BMI
	Männer	Frauen		
Untergewicht	< 20	< 19	19-24	19 - 24
Normalgewicht	20 - 25	19 - 24	25-34	20 - 25
Übergewicht	25 - 30	24 - 30	35-44	21 - 26
Adipositas	30 - 40	30 - 40	45-54	22 - 27
massive Adipositas	> 40	> 40	55-64	23 - 28

Zwar weisen Menschen mit zunehmendem Alter einen steigenden BMI auf, allerdings sind insbesondere Männer mit einem erhöhten Muskelanteil, der in der Regel mit einem erhöhten BMI einhergeht, differenziert zu betrachten. Eine Unterscheidung zwischen fettem und magerem Gewebe ist durch den BMI nicht möglich (vgl. BOGIN & VARELA-SILVA, 2012). Der BMI sollte also nicht für die Beurteilung von Einzelpersonen herangezogen werden, sondern vielmehr zum statistischen Vergleich bestimmter Populationen (vgl. KEYS et al., 1972). Bei einer gemittelten Körpergröße von 1,85 m ($\pm 0,04$ m) und einem durchschnittlichen Körpergewicht von 82,5 kg ($\pm 6,92$ kg) ergab sich ein BMI im Bereich des Normalgewichtes ($M = 22,33 \pm 1,7$). Diese Ausprägung ist auch darauf zurückzuführen, dass das Probandenkollektiv regelmäßig und konsequent Sport trieb ($M = 8,13 \pm 2,96$ h/Woche). Die mittleren Werte zeigen, dass das Probandenkollektiv innerhalb einer sehr kleinen Gruppe von ca. sechs Prozent der deutschen Bevölkerung einzuordnen ist, die mehr als fünf Stunden Sport innerhalb einer Woche betreibt (vgl. N.N., 2022a). Die Hälfte des Probandenkollektivs schätzte ihren Fitnesszustand als „gut“ ein, während 33 % (4 Probanden) die-

sen als „sehr gut“, 8 % (1 Proband) als „hervorragend“ und weitere 8 % (1 Proband) als „mittelmäßig“ einstufen. Der gute Fitness- und Trainingszustand der Teilnehmer wird durch einen eingeschränkten Alkoholkonsum (58,33 %, 7 Probanden: „selten“; 41,67 %, 5 Probanden: „regelmäßig“) sowie den weitgehenden Verzicht von Zigaretten bzw. Nikotin (91,67 %, 11 Probanden: Nicht-Raucher) bekräftigt. Weiterhin gaben 42 % der Versuchspersonen an sich „oft“ gesund zu ernähren. Demgegenüber kommen 8 % „sehr häufig“ und 50 % „eher selten“ einer gesunden Ernährung nach.

Zehn der zwölf Probanden waren Studenten. Die restlichen zwei Teilnehmer übten den Beruf eines Wissenschaftlichen Mitarbeiters und eines Akademischen Rates aus. Die dominante rechte Hand der Versuchspersonen garantierte eine einheitliche Steuerung der Microsoft® HoloLens innerhalb des gesamten Kollektivs. Drei Teilnehmer gaben zudem an, dass sie bereits Erfahrungen im Umgang mit sowohl mit HMDs (AR: HoloLens; VR: Samsung Gear) gesammelt haben.

Bei der Probandenauswahl wurde im Zuge der **zweiten Teilstudie „HoloErgo 2.0“** hinsichtlich des Geschlechts, der Altersstruktur, der sportlichen Aktivität und etwaiger Vorerkrankungen erneut auf ein homogenes Kollektiv geachtet (siehe Tab. 7.10 und Tab. 7.11). Um im Zuge eines realitätsnahen Rüstkontexts außerdem interaktionsspezifische Eigenschaften im Umgang mit der Aufgabe und dem Unterstützungssystem einzubeziehen, wurden im Vergleich zur ersten Teilstudie auch Linkshänder und auf Sehhilfen angewiesene Teilnehmer akquiriert.

Insgesamt nahmen 24 männliche Probanden an der Studie teil. Das Alter der Probanden lag zwischen 18 und 32 Jahren (Durchschnittsalter: $26,17 \pm 3,63$ Jahre). Die gemittelte Körpergröße wies 1,82 m ($\pm 0,06$ m) auf. Das gemittelte Durchschnittsgewicht des Probandenkollektivs betrug 82,92 kg ($\pm 11,77$ kg). Aus diesen Messdaten ergab sich ein durchschnittlicher BMI von 22,78 ($\pm 3,16$), der sowohl hinsichtlich des Geschlechts als auch in Bezug auf das Alter der Probanden im normalgewichtigen Bereich liegt. Die Probanden führten im Vergleich zur ersten Teilstudie ca. 3,5 Stunden pro Woche weniger sportliche Aktivitäten aus ($4,6 \pm 3,01$ h/Woche). Nichtsdestotrotz gaben 62,5 % (15 Probanden) an, ihren Fitnesszustand als „gut“ zu beschreiben – 37,5 % (9 Probanden) schätzten diesen „mittelmäßig“ ein. Weiterhin konsumierten lediglich ein Achtel der Probanden weniger als 20 Zigaretten pro Tag. 25 % (6 Probanden) des Teilnehmerfelds verzehrten regelmäßig Alkohol, 75 % (18 Probanden) nur selten. Aus diesen Angaben lässt sich schließen, dass sich das Probandenkollektiv in einem guten gesundheitlichen Allgemeinzustand befand.

Tab. 7.10: Spezifische Angaben zu den 24 männlichen Probanden der zweiten Teilstudie „Holo-Ergo 2.0“ (Teil 1 von 2)

Versuchsperson (VP)	Alter [Jahre]	Größe [m]	Masse [kg]	BMI [-]	Sport [h/Woche]
VP01	27	1,87	85	22,7	2
VP02	29	1,87	85	22,7	7,5
VP03	24	1,84	92	25,0	7
VP04	30	1,87	74	19,8	8
VP05	21	1,80	76	21,1	4
VP06	24	1,78	79	22,2	0
VP07	26	1,70	80	23,5	2
VP08	25	1,77	84	23,7	6,5
VP09	32	1,80	96	26,7	0
VP10	22	1,75	72	20,6	5
VP11	25	1,87	78	20,9	4
VP12	18	1,83	77	21,0	8
VP13	22	1,87	83	22,2	1
VP14	29	1,75	64	18,3	5
VP15	25	1,79	74	20,7	5
VP16	21	1,85	80	21,6	0
VP17	28	1,86	75	20,2	3
VP18	28	1,82	124	34,1	7
VP19	31	1,77	73	20,6	9
VP20	30	1,80	76	21,1	6
VP21	25	1,93	91	23,6	0
VP22	27	1,91	90	23,6	9
VP23	30	1,76	92	26,1	4,5
VP24	29	1,82	90	24,7	7
M ± SD	26,2 ± 3,6	1,82 ± 0,06	82,9 ± 11,8	22,78 ± 3,16	4,6 ± 3,0

Die Mehrheit des Probandenkollektivs gab eine Rechtshändigkeit an (79,17 %, 19 Probanden). Lediglich fünf Probanden waren Linkshänder (20,83%). Abweichend von der ersten Teilstudie nahmen nun auch Probanden teil, die Sehhilfen in Form von Kontaktlinsen (16,67 %, 4 Probanden) oder einer Brille (25 %, 6 Probanden) trugen.

Die Hälfte des Kollektivs übte den Beruf „Student“ aus. 9 dieser 12 Probanden konnten einem fachspezifischen Studiengang, d. h. Maschinenbau oder Wirtschaftsingenieurwesen, zugeordnet werden. Die übrigen 3 Studenten waren in fachfremden Studiengängen (Betriebswirtschaftslehre) immatrikuliert. Der Rest der Versuchsgruppe übte diverse Tätigkeiten aus. Während 6 Teilnehmer (25 %) als Maschineneinrichter, Maschinen- und Anlagenführer, Mechatroniker, Walzer und Wissenschaftlicher Mitarbeiter in fach- bzw. rüstspezifischen Berufen tätig waren, arbeiteten weitere 25 % (6 Probanden) in fachfremden Bereichen (Auszubildender, Logistikleiter, Redakteur, Schüler, Soziologe und Wissenschaftlicher Mitarbeiter).

Tab. 7.11: Spezifische Angaben zu den 24 männlichen Probanden der zweiten Teilstudie „HoloErgo 2.0“ (Teil 2 von 2)

Versuchsperson (VP)	Vorerfahrungen		Zigaretten [Stk./Tag]	Alkohol [x/Woche]	Händigkeit	Führungsaug e	Sehhilfe (Brille: B; Kontaktlinsen: KL)
	Datenbrillen	Rüstprozesse					
VP01	nein	ja	0	selten	rechts	rechts	ja (KL)
VP02	ja (HoloLens)	ja	0	regelmäßig	rechts	rechts	nein
VP03	nein	nein	0	selten	rechts	links	ja (B)
VP04	ja (HoloLens)	ja	0	selten	rechts	links	nein
VP05	nein	ja	0	selten	rechts	rechts	ja (B)
VP06	nein	nein	0	regelmäßig	links	links	ja (B)
VP07	nein	ja	0	regelmäßig	rechts	rechts	nein
VP08	nein	nein	0	selten	rechts	rechts	nein
VP09	nein	ja	0	selten	rechts	rechts	nein
VP10	nein	nein	0	regelmäßig	links	links	ja (KL)
VP11	nein	nein	0	selten	links	links	nein
VP12	nein	nein	0	selten	rechts	links	nein
VP13	nein	ja	0	selten	links	rechts	nein
VP14	nein	ja	0	selten	rechts	links	nein
VP15	nein	nein	< 20	selten	rechts	rechts	ja (B)
VP16	ja (HoloLens)	ja	< 20	selten	rechts	links	ja (KL)
VP17	nein	nein	0	selten	rechts	links	ja (KL)
VP18	nein	ja	0	selten	rechts	links	nein
VP19	nein	ja	0	selten	rechts	links	nein
VP20	nein	ja	0	selten	rechts	links	nein
VP21	nein	nein	0	selten	rechts	links	ja (B)
VP22	ja (HoloLens)	nein	< 20	regelmäßig	links	links	ja (B)
VP23	nein	nein	0	selten	rechts	links	nein
VP24	nein	nein	0	regelmäßig	rechts	rechts	nein

Sowohl die Technik-Begeisterung ($M = 3,42 \pm 1,11$) als auch der kompetente Umgang mit Technik ($M = 3,23 \pm 1,2$) und die positiv empfundenen Aspekte in Folge der Nutzung technischer Geräte ($M = 3,06 \pm 1,23$) implizieren, dass die Probanden einen begeisterungswürdigen Umgang mit Technik pflegen. Diese Erkenntnis wird von den Versuchspersonen zudem durch die tendenziell „nicht zutreffenden“ negativen Technikfolgen ($M = 2,32 \pm 1,01$) gestützt, sodass die Probanden einem technikaffinen Profil zugeordnet werden können. Somit erübrigten sich weitere inferenzstatistische Untersuchungen hinsichtlich etwaiger Korrelationen bzw. Zusammenhänge der Technikaffinität mit leistungsbezogenen Parametern.

Der mehrheitliche Teil der Versuchspersonen sammelten vor der Durchführung der Studie keine Erfahrungen mit Datenbrillen. Lediglich 4 der 24 Probanden (16,67 %) nutzten die HoloLens bereits zuvor. Etwa die Hälfte des Probandenkollektivs konnte hingegen auf Rüstenerfahrungen verweisen. Allerdings hatte keiner der Probanden zuvor Erfahrungen hinsichtlich der Durchführung eines Rüstvorgangs einer Rotationszugbiegemaschine sammeln können.

7.2 Objektivierung von Gefährdungen sowie Belastung und Beanspruchung

Um im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung und der experimentellen Studien vergleichbare Untersuchungsergebnisse generieren zu können, wurden jeweils dieselben Messverfahren und eine identische Messtechnik verwendet (siehe Abb. 7.8). Diese ermittelten einerseits die physischen Beanspruchungen der Probanden und garantierten andererseits eine uneingeschränkte Mobilität der Versuchspersonen im Zuge der Durchführung der Arbeitsaufgabe (vgl. KLUTH & STRASSER, 2000 und 2001; KLUTH et al., 1997 und 1999). Bei der Nutzung eines HMDs in Kombination mit Montage- bzw. Rüsttätigkeiten wird hinsichtlich der Interaktion und der physischen Beanspruchung des Anwenders neben einer Analyse prozessbezogener Risiken oder Gefährdungen vornehmlich von Auswirkungen auf das muskuläre System im Kopf- bzw. im Schulter-Nacken-Bereich ausgegangen. Entsprechende Auffälligkeiten können also insbesondere durch die Aufzeichnung der Muskelaktivität, der Hautoberflächentemperatur und der Körperhaltung respektive arbeitsspezifischer Bewegungsabläufe erfasst werden (vgl. THEIS et al., 2016). Somit wurde der messtechnische Fokus auf lokale und nicht auf visuelle sowie globale Parameter, wie z. B. die Herzschlagfrequenz, gelegt. In der empirischen Studie wurden mit Videokameras und der Eye-Tracking-Technologie zwar objektive Daten erhoben, diese dienten allerdings einzig der Unterstützung der qualitativen Datenauswertung. Daher werden diese beiden Technologien, auch aus Gründen der Darstellbarkeit, nicht aufgeführt.

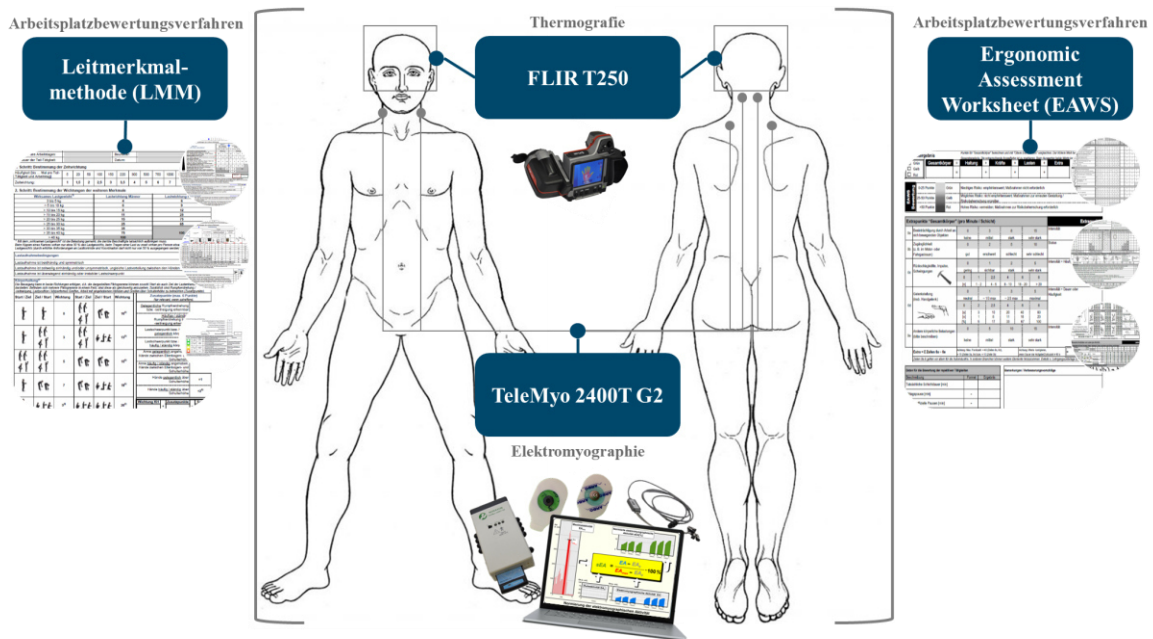


Abb. 7.8: Eingesetzte Messmethoden und Bewertungsverfahren zur Objektivierung der arbeitsbedingten Belastung und Beanspruchung

7.2.1 Arbeitsplatzbewertungsverfahren

Die Auswahl eines Arbeitsplatzbewertungsverfahrens, das für die ergonomische Bewertung eines industriellen Rüstprozesses herangezogen werden soll, bedarf neben einer Betrachtung der vorkommenden Belastungsarten einer Auswahl von zwei Bewertungsstufen. Mit einem Screeningverfahren werden zunächst potenzielle Schwerpunkte der vorliegenden Belastungssituation erarbeitet, um diese mithilfe eines Detailverfahrens darauf aufbauend zu spezifizieren.

Die Leitmerkmalmethoden sind etablierte Screeningverfahren und decken als solche den Großteil der für Rüstvorgänge erforderlichen und durchgeführten Einzeltätigkeiten ab. Trotz ihrer Fokussierung auf einzelne Belastungsschwerpunkte berücksichtigen sie in gemäßigtem Umfang weitere Faktoren, wie die Körperhaltung. Bei der Auswahl des Detailverfahrens sind sämtliche vorkommenden Belastungsarten von Interesse, sodass die Verwendung des EAWS erforderlich wird.

7.2.1.1 Leitmerkmalmethode

Die Leitmerkmalmethode stellt ein von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und vom Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) bzw. von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) entwickeltes einfaches, aber orientierendes und etabliertes Screeningverfahren zur Bestimmung und Beurteilung körperlich schwerer Arbeit in Bezug auf die wesentlichen physischen Belastungsfaktoren dar (vgl. N.N., 2019b). Die Evaluierung entsprechender Arbeitsbedingungen wird von den genannten Institutionen gemäß des § 2 der Lasthandhabungsverordnung (LasthandhabV) und der §§ 5 und 6 des ArbSchG empfohlen.

Biomechanische Wirkmechanismen bilden zusammen mit Dosismodellen die Bewertungsgrundlage für die LMM. Dabei werden interne Belastungen des Muskel-Skelett-Systems, der Lendenwirbelsäule sowie die Belastung spezifischer Körperelemente betrachtet. Die Beurteilung bezieht sich auf einen Arbeitstag bzw. eine Arbeitsschicht und erfolgt prinzipiell für Teiltätigkeiten. Bei wechselnden Lastgewichten und/oder Körperhaltungen müssen innerhalb einer Teiltätigkeit Mittelwerte gebildet werden. Bei deutlich unterschiedlichen Lastenhandhabungen mehrerer Teiltätigkeiten innerhalb der Gesamttätigkeit sind diese getrennt einzuschätzen und zu dokumentieren.

Grundlegende Voraussetzung für die Beurteilung ist – ohne ergonomische oder sicherheitstechnische Zusatzkenntnisse – eine gute Kenntnis der zu beurteilenden Tätigkeit. Repräsentative Ergebnisse erfordern eine genaue Beobachtung und Dokumentation der Teiltätigkeit. Als zusätzliches Instrument kann eine Befragung der ausführenden Mitarbeiter durchgeführt werden.

Die LMM-Versionen aus dem Jahre 2001 wurde im Jahr 2019 überarbeitet und erweitert. Insgesamt unterscheidet die LMM nun sechs unterschiedliche Belastungsarten (vgl. N.N., 2019c):

1. Manuelles Heben, Halten und Tragen von Lasten
2. Manuelles Ziehen und Schieben von Lasten
3. Manuelle Arbeitsprozesse
4. Ausübung von Ganzkörperkräften
5. Körperfortbewegung
6. Körperzwangshaltungen

In Bezug auf den vorliegenden Rüstkontext werden lediglich die prozessbezogenen Belastungsarten anhand des dafür relevanten Leitmerkmals „*manuelle Arbeitsprozesse*“ analysiert. Zwecks einer verbesserten Verständlichkeit des Kontextes hinsichtlich der Ergebnisbeschreibung und -darstellung der manuellen Arbeitsprozesse werden nachfolgend außerdem die Leitmerkmale „*Heben, Halten und Tragen*“ sowie „*Ziehen und Schieben*“ beschrieben. Die Formblätter zur Beurteilung und Gestaltung bei manuellen Arbeitsprozessen inklusive der zugehörigen Wichtungstabellen des jeweiligen Verfahrens sind mitsamt der in Kapitel 8 beschriebenen Ergebnisse dem Anhang E (Abb. E24-E27) beigelegt. Die Beurteilung der Papier- und Bleistiftmethode erfordert drei Schritte:

1. Bestimmung der Zeitwichtung
2. Bestimmung der Wichtung der Leitmerkmale
3. Bewertung

Aus den Einschätzungen der LMM wird ein Risikowert mithilfe eines in Tabelle 7.12 dargestellten Beurteilungsmodells bzw. anhand eines Ampelschemas (vgl. DIN EN 614-1, 2009) ermittelt und dem entsprechenden Risikobereich zugeordnet. Werte mit einem Punktwert über 50 gelten als stark risikobehaftet, eine technische und/oder organisatorische Umgestaltung des Arbeitsplatzes ist unabdingbar. Während Werte bis 25 praktisch sicher sind, muss die individuelle Belastungswahrnehmung der Beschäftigten im Bereich von 25 bis 50 durch eine Befragung zur Arbeitsbeanspruchung und zu gesundheitlichen Beschwerden ermittelt werden. Somit können arbeitsbedingte Zusammenhänge aufgedeckt und Gestaltungsnotwendigkeiten abgeleitet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Belastung des Muskel-Skelett-Systems mit steigenden Punktwerten zunimmt. Aufgrund der individuellen Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen sind die Grenzen zwischen den Risikobereichen fließend. Somit wird die Einstufung lediglich als orientierendes Hilfsmittel herangezogen.

Tab. 7.12: Beurteilungsmodell der LMM (u. a. nach N.N., o.J.b)

Risikobereich	Punktwert	Beschreibung
1	< 10	geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich
2	10 bis < 25	mittlere Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich; für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll
3	25 bis < 50	erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich; Gestaltungsmaßnahmen sind zu prüfen
4	≥ 50	hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich; Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich

Heben, Halten und Tragen

Die Bewertung von Heben, Halten und Tragen beginnt mit der Ermittlung der Zeitwichtung. Dabei wird die absolute Häufigkeit von kurzen Hebe- oder Umsetzvorgängen (< 5 Sekunden), längerem Halten (> 5 Sekunden) sowie Tragen über mehr als fünf Meter bestimmt. Der Anzahl, der Gesamtdauer und des Gesamtweges entsprechend wird eine Zeitwichtung zwischen 1 und 10 ermittelt.

Die Bestimmung der Wichtung des Lastgewichts, der Körperhaltung sowie der Ausführungsbedingungen ist Bestandteil des zweiten Schritts. Die wirksame Last wird geschlechterspezifisch ermittelt. Dabei entspricht diese nicht zwangsläufig dem Gewicht des Gegenstandes, da bspw. beim Kippen eines Kartons nur 50% der Lastmasse wirkt. Die Körperhaltung ist anhand der im Formblatt enthaltenen Piktogramme für die jeweilige Teiltätigkeit zu beurteilen. Die Ausführungsbedingungs-wichtung ergibt sich aus der zeitlich überwiegenden Ausführungsbedingung. Dabei werden ergonomische Bedingungen, wie der Bewegungsfreiraum, eine ausreichende Beleuchtung, die Bodenbeschaffenheit und Griffbedingungen, betrachtet.

Im dritten und letzten Schritt werden die aus Schritt zwei bestimmten Wichtungen aufsummiert und mit der jeweiligen Zeitwichtung multipliziert. Anhand des errechneten Punktwertes kann mithilfe des Beurteilungsmodells eine Risikoeinschätzung vorgenommen werden.

Ziehen und Schieben

Die Ermittlung der Zeitwichtung im Rahmen der Beurteilung von Ziehen und Schieben erfolgt getrennt über kurze Distanzen, wobei der Einzelweg fünf Meter nicht überschreiten darf, und längere Distanzen (Einzelweg > 5 Meter). Auch bei diesem Verfahren ergibt sich eine Wichtung zwischen 1 und 10.

Anschließend werden die Wichtungen von Masse, Positioniergenauigkeit, Geschwindigkeit, Körperhaltung und Ausführungsbedingung bestimmt. Die Ermittlung der Massewichtung erfolgt unter Berücksichtigung der zu bewegenden Masse (Gewicht von Fördermittel plus Ladung) und der Transportart, bspw. Flurförderzeug oder Hilfsmittel. Dabei ist zwischen rollenden und gleitenden Lastgewichten zu unterscheiden. Die zweite Wichtung ergibt sich aus den Vorgaben für die Positioniergenauigkeit und der Bewegungsgeschwindigkeit. Im Anschluss wird die während der Ausführung eingenommene Körperhaltung sowie die Ausführungsbedingung ermittelt, welche sich in gute, eingeschränkte, schwierige und komplizierte Ausführungsbedingungen unterteilt. Diese Beurteilung hängt von der Fußbodenbeschaffenheit, den Hindernissen auf dem Weg und der Beschaffenheit der Rollen oder Räder an der Last ab.

Im letzten Schritt werden zunächst die Wichtungen des zweiten Schritts addiert, mit der Zeitwichtung multipliziert und – sofern weibliche Mitarbeiterinnen berücksichtigt werden sollen – mit dem Faktor 1,3 multipliziert. Hierbei wird berücksichtigt, dass eine Frau im Durchschnitt etwa Zweidrittel der physischen Leistungsfähigkeit eines Mannes besitzt. Auch hier erfolgt abschließend eine Risikoeinschätzung anhand des errechneten Punktwertes.

Manuelle Arbeitsprozesse

Die Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen ist Bestandteil der dritten Variante der LMM. Bei der Bestimmung der Zeitwichtung sind die Dauer der zu beurteilenden Tätigkeit ohne Rüstzeiten, Verteilzeiten und andere Arbeiten pro Schicht zu berücksichtigen.

Der zweite Schritt umfasst die Bestimmung der Wichtungen der Kraftausübung, der Greifbedingungen, der Arbeitsorganisation, der Ausführungsbedingungen, der Körperhaltung sowie der Hand-/Armstellung und -bewegung. Die Wichtung der Kraftausübung erfolgt für die linke und rechte Hand auf Grundlage der Ausübungsart im Finger-Handbereich und der mittleren Haltedauer sowie der mittleren Bewegungshäufigkeit getrennt bzw. separat. Dabei ist der höhere der beiden

Werte zu verwenden. Mit einer Einstufungshilfe wird die Kraftausübung beurteilt, die sich von sehr geringen Kräften (z. B. Tastenbedienung) bis hin zu Spitzenkräften (z. B. Schrauben anziehen) oder Schlagen (z. B. Schlagen mit bloßer Hand) erstreckt. Bei Zykluszeiten bis 60 Sekunden ist die Analyse von fünf bis zehn Zyklen ausreichend. Die Greifbedingungen definieren sich über ergonomische Eigenschaften, wie die Griffgestaltung und deren Oberflächenbeschaffenheit. Bei den Hand-/Armstellungen und -bewegungen sind das Bewegungsausmaß und die Häufigkeit zu berücksichtigen, wobei in erster Linie die Auslenkungen der Gelenke eine Rolle spielen. Eine schlechte Gelenkauslenkung geht mit einer höheren Wichtung einher. Die Häufigkeit der Belastungswechsel bestimmt die Wichtung der Arbeitsorganisation. Je häufiger Belastungswechsel erfolgen, desto geringer ist die Wichtung. Ausführungsbedingungen werden durch die Detailerkennbarkeit, die klimatischen Bedingungen und Lärm bewertet. Die Wichtungsbestimmung der Körperhaltung berücksichtigt typische Körperhaltungen, deren Bewertung sich von „gut“ (Wichtung 0) bis hin zu „schlecht“ (Wichtung 5) erstreckt.

Im dritten Schritt wird die Summe der sechs Wichtungen mit der Zeitwichtung multipliziert. Das Ergebnis stellt den tätigkeitsbezogenen Punktwert dar, der mit Hilfe der Bewertungsgrundlage auf ableitbare Gestaltungsnotwendigkeiten schließen lässt.

7.2.1.2 Ergonomic Assessment Worksheet

Das „Ergonomic Assessment Worksheet“ (auch „European Assembly Worksheet“) ist das offizielle Ergonomiewerkzeug der internationalen Methods-Time-Measurement (MTM)-Vereinigung. Es kann als First-Level-Screening- respektive Grob-Screening-Verfahren eingesetzt werden, um ergonomische Risiken aufgrund biomechanischer Überlastungen festzustellen. Ab einem hohen Detaillierungsgrad der zu betrachtenden Tätigkeit wird das EAWS, wie im Rahmen dieser Arbeit, als Second-Level-Analysewerkzeug bzw. als Expertenverfahren herangezogen. Das EAWS wurde als Papier- und Bleistiftmethode in Kooperation des Instituts für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt mit dem Internationalen MTM-Direktorat entwickelt (vgl. N.N., 2010; N.N., 2009; N.N., 2007).

Das EAWS bewertet und dokumentiert unter Einhaltung der nationalen und internationalen Arbeitsgesetzgebung (Richtlinie 2006/42/EG, Richtlinie 89/391/EWG) Arbeitsbedingungen hinsichtlich der Arbeitsbelastung des Beschäftigten. Es ist eine Weiterentwicklung des „Automotive Assembly Worksheet“, das mit allen Teilen der Standardbestimmungen der DIN EN 1005 (2009) und der korrespondierenden ISO-Standards (11226, 2000; 11228, 2003 und 2007) übereinstimmt (vgl. N.N., 2009; N.N., 2007; MICHAEL, 2002). Das Bewertungsschema unterteilt sich in fünf unterschiedliche Sektionen: Datenbasis und Ergebnis (Sektion 0), 2D- und 3D-Körperhaltungen

(Sektion 1), Aktionskräfte (Sektion 2), Handhaben von Lasten (Sektion 3) und Obere Extremitäten (Sektion 4).

Das Formblatt umfasst vier DIN-A4-Seiten (siehe Abb. E28-E35, Anhang E; N.N., o.J.a). Die sich aus der Bewertung der einzelnen Sektionen ergebenden Belastungspunkte bilden die Grundlage für die Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe (vgl. SCHAUB et al., 2012). Anhand eines Ampelschemas nach DIN EN 614-1 (2009) gemäß einer der LMM ähnlichen 3-Zonen-Bewertung können Maßnahmen zur Risikominimierung abgeleitet bzw. Handlungsbedarf aufgezeigt werden (siehe Abb. 7.9).

> 50 Punkte	Hohes Risiko ist zu vermeiden! Das Risiko einer Erkrankung oder Verletzung ist offensichtlich und es ist nicht annehmbar, die Mitarbeiter diesem Risiko auszusetzen.	Maßnahmen zur Risikominimierung sind dringend erforderlich.
> 25 bis 50 Punkte	Mögliches Risiko; nicht empfehlenswert! Für die Mitarbeiter besteht insgesamt bzw. teilweise ein nicht zu unterschätzendes Risiko einer Erkrankung oder Verletzung.	Detaillierte Risikoabschätzung ist erforderlich. Maßnahmen zur erneuten Gestaltung bzw. Risikobeherrschung sollten ergriffen werden.
0 bis 25 Punkte	Niedriges Risiko; empfehlenswert! Das Risiko einer Erkrankung oder Verletzung ist vernachlässigbar bzw. es ist auf einem annehmbaren Niveau.	Maßnahmen sind nicht erforderlich.

Abb. 7.9: Risikobereiche der EAWS (modifiziert nach N.N., 2009)

Das Formblatt gibt bei der Einstufungsart „Sekunden pro Minute“ oder „Minuten pro 8h“ vor, die Einzeleinstufungen an den vorgegebenen Stellen zu korrigieren, falls die Taktzeit nicht 60 Sekunden entspricht. Die korrigierte Zeitdauer errechnet sich nach Formel 7.1.

$$\text{Zeitdauer} = \frac{(\text{Haltungs- bzw. Bewegungsdauer [sec]} \times 60 [\text{sec}])}{\text{Taktzeit [sec]}} \quad (7.1)$$

SCHAUB & GHEZEL-AHMADI (2007) und SCHAUB (2004) empfehlen außerdem im höheren Belastungspunktbereich eine Interpolation, falls die Belastungsdauer im mittleren Wertebereich liegt. Die Punktzahlen werden durch die Interpolation zwischen den Randwerten des betrachteten Intervalls errechnet. Generell gelten für die Berechnung des interpolierten Punktwertes X die Regeln der linearen Interpolation (siehe Abb. 7.10 und Formel 7.2).

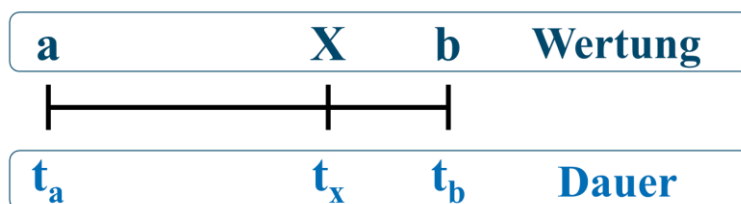


Abb. 7.10: Vorgabe zur Bestimmung des interpolierten Punktwertes X (modifiziert nach N.N., 2009)

$$X = a + \left(\frac{b-a}{t_b-t_a} \right) \cdot (t_x - t_a) \quad (7.2)$$

Sektion 0 – Datenbasis und Ergebnis

Die Sektion 0 umfasst insgesamt fünf Ebenen, bestehend aus Datenkopf, Analyseergebnis, Extrapunkte, Anmerkungen und Berechnung der Belastungsdauer.

Der Datenkopf gibt wesentliche Informationen über die Tätigkeit, das Werk, die Produktionslinie, die Taktzeit, das Analysedatum sowie über den durchführenden Analytiker. Außerdem wird Auskunft über das Geschlecht und die Körpergröße des Werkers gegeben, da diese Daten einen erheblichen Einfluss auf Leistungsfähigkeit und Belastungshöhe haben können.

Das EAWS-Analyseergebnis teilt sich in die Bewertung des Gesamtkörpers als Summe der Haltungs-, Kraft-, Lasten- und Extrapunkte (linke Ampel) sowie in die Bewertung der Belastungspunkte der oberen Extremitäten (rechte Ampel) auf.

Die Summe der Extrapunkte ergibt sich aus der Beeinträchtigung durch die Arbeit an sich bewegenden Objekten, der Zugänglichkeit, der Schwingungen, Impulse und Rückschlagkräfte, der Gelenkstellung sowie anderen körperlichen Belastungen. Die Bewertung findet anhand der Belastungshöhe und -dauer statt. Die Dauer kann in Sekunden pro Minute oder als Häufigkeit pro Minute oder pro Schicht erfolgen. Eine Bewertung der Handgelenkstellung findet nur statt, wenn diese als statische Haltung oder in Verbindung mit Kraftausübungen vorliegt. Bei der Beurteilung sollten neben den vorgegebenen Belastungspunktbereichen zusätzlich die zugehörigen EAWS-Einstufungsanleitungen beachtet werden. Beispielhaft sind dafür die in Tabelle 7.13 dargestellten Punkteskalen der Zugänglichkeit aufgeführt. Dabei darf die durch den Wertebereich vorgegebene Maximalpunktzahl des jeweiligen Typs nicht überschritten werden. Schwingungen, Impulse oder Rückschlagkräfte sind ebenso wie die Gelenkstellung als das Produkt aus Anzahl bzw. Dauer und Intensität des jeweiligen Merkmals zu errechnen.

Die Anmerkungen dienen in dieser Sektion als Anstoß zu Verbesserungsvorschlägen im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung innerhalb des Unternehmens. Außerdem können hier andere körperliche Belastungen beschrieben werden.

Abschließend erfolgt die Berechnung der Belastungsdauer, die Auskunft über die Nettodauer der repetitiven Tätigkeiten gibt. Der Quotient aus Nettodauer und Stückzahl pro Schicht bzw. Takte oder Zyklen multipliziert mit 60 wird als Netto-Zykluszeit in Sekunden angegeben.

Tab. 7.13: Vorgegebener Belastungspunktbereich der Zugänglichkeit und zugehörige EAWS-Einstufungshilfe für die Zugänglichkeit (modifiziert nach N.N., 2009)

Punktwerte zur Zugänglichkeit (z. B. Motor- oder Passagierbereich)	Zugänglichkeit nach dem vorgegebenen Belastungspunktbereich	Zugänglichkeit nach der zugehörigen EAWS-Einstufungshilfe
0	gut	von außen
2	erschwert	-
3	-	Fußraumoperationen
5	schlecht	Operationen im Tunnelbereich
8	-	Einsteigen in den vorderen Innenraum
9	-	Einsteigen in den hinteren Innenraum
10	sehr schlecht	Einsteigen in den Motorraum

Sektion 1 – Körperstellung bzw. Rumpf- und Armhaltungen

In Sektion 1 werden Körper-, Rumpf- und Armhaltungen sowie Bewegungen des Körpers bewertet und anhand von symmetrischen bzw. zweidimensionalen und asymmetrischen bzw. dreidimensionalen Körperhaltungen unterschieden.

Zur Bewertung der Haltungsbelastung werden zunächst die Körperstellungen mithilfe von Stehen, Sitzen, Knien oder Hocken sowie durch Liegen und Klettern mit deren entsprechendem zeitlichen Anteil für statische Rumpf- und Armhaltungen betrachtet. Ergänzend dazu wird die Körperhaltung im Hinblick auf die Rumpfdrehung und -neigung sowie auf eine zusätzliche Belastung durch körperferne Armhaltung außerhalb der normalen Arbeitsfläche beobachtet und dokumentiert. Eine symmetrische und asymmetrische Körperhaltung muss mindestens vier Sekunden andauern.

Die EAWS ermittelt hier eine Risikobewertung durch die Multiplikation der Intensität I (z. B. Rumpfauslenkung $> 60^\circ$) mit der Dauer- oder der Anzahl D (z. B. 20 Sekunden pro 60 Sekunden Taktzeit). Die Punktbewertung der Körperhaltungen beinhaltet geringe Aktions- und Gewichtskräfte (≤ 30 N für Fingerkräfte und ≤ 40 N für Arm-Schulterkräfte), sodass diese im Rahmen der Bewertung der Aktionskräfte nicht einbezogen werden. Die Punktwerte werden für die Körperstellungen und -haltungen separat berechnet und schließlich aufsummiert, um das Gesamtergebnis zwecks der Risikoeinstufung in Sektion 0 zu übernehmen.

Sektion 2 – Aktionskräfte

Sektion 2 bewertet die Körperkräfte, die vom Körper nach außen gerichtet wirken. Dazu zählen Fingerkräfte (Ein-Hand-Kräfte) sowie Arm- und Ganzkörperkräfte (Zwei-Hand-Kräfte).

In diesem Bewertungsabschnitt ist das Kraftniveau mitbestimmend. SCHAUB (2004) und SCHAUB & GHEZEL-AHMADI (2007) gehen analog zur DIN EN 1005-3 (2008) von einer geschlechtsneutralen Gleichverteilung der Maximalkräfte in der Bevölkerung aus. Während für die

Planungsanalyse das 15. Kraftperzentil der Grundgesamtheit herangezogen wird, bezieht sich die geschlechtsneutrale Analyse von vorhandenen Arbeitsplätzen bzw. -tätigkeiten (Ist-Zustand) auf das 40. Kraftperzentil. Die Werte werden dabei für die Arm- und Ganzkörperkräfte der jeweiligen Körpersymmetrieebene (bspw. B-: frontal-horizontal) entsprechend aus dem „Montagespezifischen Kraftatlas“ von WAKULA et al. (2009) entnommen. Sofern die Kraftausübung durch einen Arm erfolgt, wird abhängig vom Haltungstyp der Maximalkraftwert halbiert. Für die Fingerkräfte werden Werte aus dem Kraftatlas in Abhängigkeit der Greifart herangezogen. Um eine Tätigkeit als Aktionskraft bewerten zu können, muss die Arbeitsperson eine Mindestkraft von 30 N für Hand-Finger-Kräfte und 40 N für Arm-Schulter-Kräfte aufbringen. Unter dieser Grenze ist Sektion 2 nicht anwendbar und Kraftpunkte können somit nicht berechnet werden. Sektion 1 (Körperhaltungen) und/oder Sektion 4 (hochrepetitive Tätigkeiten und kleine Lasten) berücksichtigen die durch Aktionskräfte erzeugte biomechanische Kraft.

Die Punktbewertung ergibt sich aus statischen (in Sekunde/Minute oder Prozent/Minute) und dynamischen (Anzahl/Minute) Anteilen der jeweiligen Kräfte. Bei statischen und/oder dynamischen Tätigkeiten mit unterschiedlichem Kraftniveau werden die Punkte für Dauer bzw. Anzahl oder Häufigkeit addiert. Die Gesamtpunkte für das Kraftniveau werden mittels eines gewichteten Durchschnitts berechnet, wobei eine Interpolation möglich ist. Bei der Berechnung wird nicht zwischen dem linken und rechten Arm unterschieden, um die Häufigkeit der Aktionskräfte zu ermitteln. Der Risikoindex setzt sich wiederum zusammen aus dem Produkt des Kraftniveaus- oder der Intensitätspunkte und der Dauer- oder Anzahlpunkte. Das Gesamtergebnis wird auf den nächsten halben Wert aufgerundet.

Sektion 3 – Manuelles Handhaben von Lasten

Das manuelle Handhaben von Lasten wird analog zur Bewertung der LMM durchgeführt. Mithilfe des Lastgewichts werden geschlechterspezifische Lastpunkte entsprechend der Belastungsfälle Umsetzen (Heben bzw. Absetzen), Tragen und Halten sowie Ziehen und Schieben verteilt. Der Fall Ziehen und Schieben betrachtet zusätzlich das verwendete Arbeitsmittel. Die Beurteilung erfolgt anhand der in Abbildung 7.11 dargestellten Lasttypen. Im Anschluss werden für die repräsentative Körperhaltung sowie die Position der Lasthaltungspunkte für das Umsetzen, Halten und Tragen vergeben. Für das Ziehen und Schieben werden zudem Ausführungspunkte berücksichtigt, die sich aus dem vorhandenen Rollwiderstand ergeben.

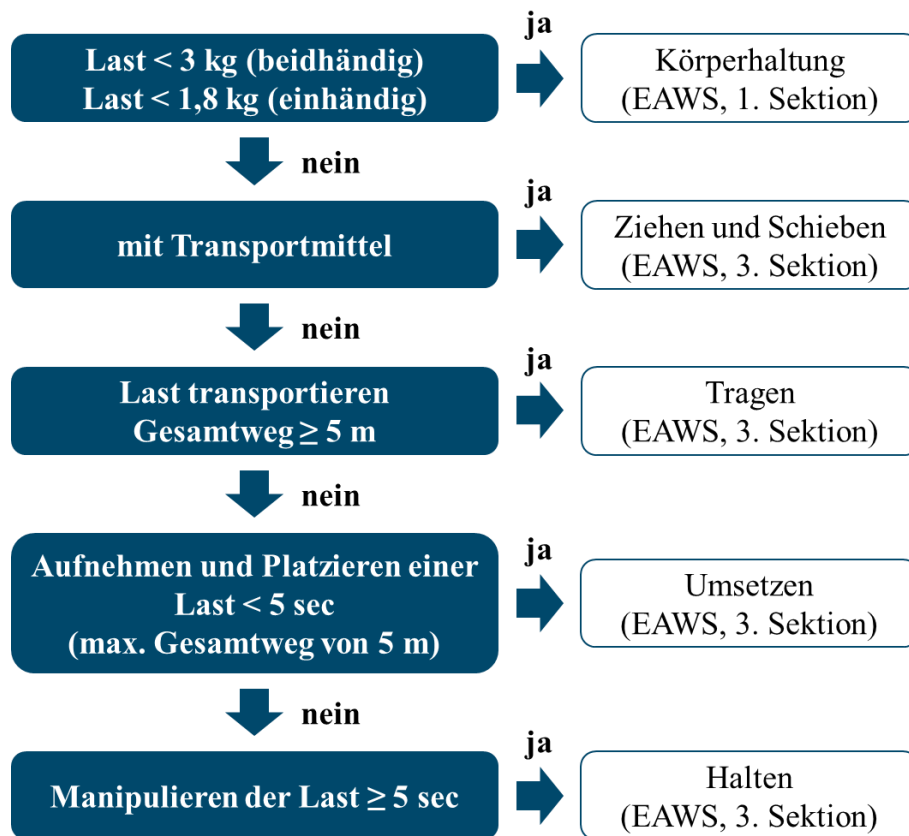


Abb. 7.11: Verschiedene Lasttypen innerhalb der EAWS-Analyse (nach N.N., 2009)

Schließlich erfolgt die Bewertung der Häufigkeit der Lastenhandhabung (Anzahl/Schicht), der Haltedauer (Minuten) und der Wegstrecke (Meter/Schicht). Die errechnete Summe der Häufigkeits-, Zeit- und Wegpunkte darf für alle Tätigkeiten einen Punktwert von 15 nicht überschreiten. Die ermittelten Lasten-, Haltungs- und Ausführungspunkte werden addiert und mit den Anzahl-, Zeit- oder Wegpunkten des jeweiligen Lastfalls multipliziert. Die Summe der vier verschiedenen Lastenpunktwerte ergibt das Gesamtergebnis dieser Sektion.

Sektion 4 – Belastung der oberen Extremitäten durch repetitive Tätigkeiten

In der vierten und letzten Sektion wird die Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven manuellen Tätigkeiten eingestuft. Der oberen Extremität sind Schultergürtel (Schulterblatt und Schlüsselbein) sowie die freie obere Extremität (Arm) zugehörig. Der Arm gliedert sich wiederum in Oberarm, Unterarm und Hand, bestehend aus Handwurzel, Mittelhand und Finger.

Bei der Risikoanalyse wird die Anzahl aller realen Aktionen innerhalb eines Zyklus bzw. Taktes getrennt für jede Extremität festgehalten. Dabei werden sowohl statische als auch dynamische reale Aktionen entsprechend ihrem Umfang und ihrer Frequenz (Dauer) bewertet. Eine „reale Aktion“ ist eine Aktion, bei der eine der oberen Extremitäten eine Bewegung an oder mit einem

Objekt respektive einer Komponente ausführt. Im Allgemeinen generiert jede montierte Komponente mindestens eine reale Aktion. Zur Einschätzung der Anzahl aller realen Aktionen innerhalb eines Taktes kann nach Tabelle 7.14 getrennt für jede Extremität ein Universelles Analysiersystem (UAS) als MTM-Prozessbausteinsystem zur Hilfestellung in der Planungsphase angewendet werden.

Tab. 7.14: Tabelle zur Einschätzung aller realen Aktionen (nach N.N., 2009)

UAS	Bedeutung	reale Aktionen
Axx	Aufnehmen und Platzieren	1
Pxx	Platzieren, Hilfsmittel anschalten	1
Hxx	Hilfsmittel aufnehmen, platzieren und ablegen	2
Ehx	Hilfsmittel aufnehmen und ablegen	1
Zax	Bewegungszyklen	1
ZBx	Bewegung, Bewegungsfolge	
ZD	Festmachen und Lösen	
ZCx	Umsetzen und Bewegung	2
Bxx	Betätigung	1
Kx	Körperbewegung, z.B. Gehen, Sitzen, Knien etc.	0
VA	visuelle Kontrolle	0

Die Gesamtbewertung der Aktionspunkte wird abhängig von der jeweiligen Greifbedingung in einer Skala von guten bis schlechten Greifbedingungen unter Berücksichtigung des relativen Zeitanteils abgeschlossen.

Im Anschluss daran werden anhand des Zeitanteils der stärksten Belastung von Hand-, Unterarm- oder Schulter die Hand- bzw. Armhaltungspunkte bestimmt. Falls Aktionen auf oder über Schulterhöhe ohne Abstützung oder mit ungünstiger Körperhaltung erbracht werden, wird die Punktzahl verdreifacht.

Die Vergabe von Zusatzpunkten erfolgt, sofern zusätzliche Beeinträchtigungen eintreten, bspw. durch verwendete Werkzeuge, die Hautkompressionen verursachen. Außerdem werden Dauerpunkte vergeben, die sich auf die Dauer der repetitiven Bewegungen beziehen. Dabei ergibt die Summe der Zeitanteilspunkte (Dauer in Stunden/Schicht) und der Organisationspunkte abzüglich der Erholungspunkte die Dauerpunktzahl. Das Kriterium der Arbeitsorganisation ist die Möglichkeit des Auftretens von Arbeitsunterbrechungen, die zu Prozessstörungen führen. Erholpausen werden erst ab einer Dauer von mindestens acht Minuten als solche charakterisiert.

Die Ermittlung des Risikos für die oberen Extremitäten erfolgt durch Multiplikation der Dauerpunkte mit der Summe aus Fingerpunkten, Hand- bzw. Armhaltungspunkten und Zusatzpunkten.

7.2.2 Objektive Messmethoden

Zur Herstellung vergleichbarer Evaluationsdaten wurden im Zuge der Teilstudien-Durchführung messtechnische Verfahren durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden.

7.2.2.1 Messtechnische Erfassung der Elektromyographischen Aktivität mittels Oberflächen-Elektromyographie

Die Elektromyographie stellt ein neurophysiologisches Diagnoseverfahren zur Analyse der ausgestrahlten elektrischen Signale von Muskeln dar (vgl. BASMAJIAN & DELUCA, 1985). Die Kontraktion der Muskulatur wird mithilfe dieser elektrischen Signale gesteuert. Die Oberflächen-Elektromyographie umfasst die Ableitung, Analyse und grafische Darstellung elektrischer Vorgänge in der Muskulatur.

Für die elektromyographischen Untersuchungen wurde das Messsystem „TeleMyo 2400T G2“ von Noraxon (siehe Abb. 7.8) genutzt. Das Messequipment setzte sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Einmal-Oberflächenelektroden „H93SG“ von Kendall (42 mm x 24 mm), die mit einem Silber-Silberchlorid-Sensor ausgestattet sind, stellen mittels eines Hydrogels einen guten Kontakt zwischen Haut und Sensor sicher. Eine auf der Unterseite der Elektrode befindliche Klebefläche gewährleistet die Applizierung am Probanden. An die Oberseite der Elektroden bzw. an einen daran mündenden Druckknopf werden Signalkabel mit integriertem Vorverstärker (Differenzverstärker) angeschlossen, um das durch die Muskeln innervierte analoge Signal um einige Zehnerpotenzen zu verstärken und an einen akkubetriebenen und mobil tragbaren Transmitter weiterzuleiten. Die Trennung des Probanden von der Netzspannung wird durch eine ohne Zwischenschaltung erfolgende Funkübertragung des Biosignals gewährleistet. Der Transmitter wandelt das analoge Signal in ein digitales Signal um. Ergänzend dazu ist der Transmitter mit verschiedenen Filtereinheiten zur Unterdrückung störender Einflüsse ausgestattet (vgl. N.N., o.J.d). Neben einem Hochpassfilter zur Unterdrückung instabiler Frequenzanteile unterhalb von 8 Hz, verhindert der Tiefpassfilter respektive „Anti Aliasing“-Filter die Einbeziehung von Frequenzen, die oberhalb der Hälfte der Abtastrate bzw. -frequenz des analogen OEMG-Rohsignals (ca. 1.500 Hz) liegen. Beide Filter bestimmen die Bandbreite des Rohsignals, das von dem Analog-Digital-Wandler erfasst wird. Das entstandene Rohsignal wird schließlich vom Transmitter via „Wireless Local Area Network“ (WLAN) an den Mini-Daten-Receiver gesendet. Der Receiver, der über eine USB-Schnittstelle mit einem Laptop verbunden ist, überträgt die digitalen Daten an die Messsoftware

„MR-XP 1.07 Master Edition“. Innerhalb der Software können insgesamt acht Eingangssignale als Elektromyographische Aktivität (EA) in Mikrovolt (μV) in Echtzeit und synchronisiert mit einer Videokamera angezeigt, fortwährend überwacht und schließlich gespeichert bzw. exportiert werden.

Die eigentliche Datenverarbeitung beginnt mit der Berechnung der elektromyographischen Aktivität $EA(t)$ durch Gleichrichtung und Integration des Roh-EMG-Signals $EMG(t)$ auf Grundlage der Zeitbasis T_B (STEINHILBER et al., 2013):

$$EA(t) = \frac{1}{T_B} \int_0^{T_B} |EMG(t)| dt \quad (7.3)$$

Eine softwareseitige Glättung entfernt die „Peaks“ der erhaltenen EA. Um nicht nur aktuelle Belastungen, sondern aussagekräftige Vergleiche auf Grundlage individueller Beanspruchungen durchführen zu können, sind zur momentanen EA Referenzwerte erforderlich. Zur Normierung der abgeleiteten, gleichgerichteten und geglätteten Aktivität wird – wie bei statischen Normierungsverfahren – für jeden Muskel ein linearer Ansatz zur Darstellung des EA-Kraft-Verlaufs genutzt, der die elektromyographische Aktivität zur aufgebrachten Kraft in Beziehung setzt (vgl. u. a. MARRAS & LAVENDER, 1991; MIRKA, 1991). Dazu wird zunächst eine Messung der Ruheaktivität EA_0 zu Versuchsbeginn vorgenommen. Mittels isometrischer Willkürkontraktion („Maximum Voluntary Contraction“, MVC) wird die muskelspezifische maximale EA (EA_{max}) im Anschluss an die Versuchsreihen gemessen. Die relative Beanspruchung in Form der normierten bzw. standardisierten EA (sEA) kann dann mit Bezug zur elektromyographischen Aktivität zum Zeitpunkt t für sämtliche Arbeitsphasen respektive für jeden Versuchspunkt errechnet werden.

$$sEA = \frac{EA - EA_0}{EA_{max} - EA_0} \cdot 100\% \quad (7.4)$$

Das international anerkannte und häufig eingesetzte Normierungs-Verfahren schafft einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der bei der Arbeitsaufgabe erfassten elektromyographischen Aktivität der zu beobachtenden Muskeln mit deren jeweils vorhandenen maximalen Kapazitäten. Dieser Zusammenhang bietet gute Interpretationsmöglichkeiten für die jeweilige muskuläre Beanspruchung bei der zu beobachtenden Tätigkeitsausführung (vgl. u. a. STEINHILBER et al., 2013; STEINHILBER & RIEGER, 2013). Allerdings setzt die MVC-Methode einen guten gesundheitlichen Zustand des Probandenkollektivs voraus. Neben einem ausgewogenen Trainingszustand ist auch eine individuelle Vorbereitung auf die durchzuführenden Maximalkraftübungen erforderlich (KONRAD, 2011). Je nach Übung und Motivation bzw. Einsatz der Probanden können sich bei der Messung Abweichungen von 20 bis 40 Prozent von der tatsächlichen Maximalkraft für den zu untersuchenden Muskel ergeben (vgl. STEINHILBER et al., 2013).

Aufgrund der zuvor beschriebenen Limitierungen der MVC-Methode wird innerhalb von Versuchsreihen auch auf Bezugsgrößen mit submaximalen isometrischen Muskelkontraktionen („Reference Voluntary Contractions“, RVC) zurückgegriffen. Diese können bspw. auf einer exakt definierten Ausübung seitens der Probanden basieren, die durch den Einsatz von Zusatzgewichten, etwa in Form von Hanteln, ergänzt werden. Zwar sind u. a. die physiologischen Anforderungen an das Probandenkollektiv im Vergleich zur MVC-Methode weniger umfangreich, jedoch stehen die ermittelten Werte nur in Zusammenhang mit der submaximalen Referenzkontraktion und erlauben somit keine Rückschlüsse auf die vorliegende Beanspruchung im Vergleich zum Kapazitätsmaximum des Muskels (vgl. STEINHILBER & RIEGER, 2013). In einer von STEINHILBER & RIEGER (2013) durchgeführten vergleichenden Betrachtung der beiden Varianten mit maximalen und submaximalen Referenzkontraktionen konnte auf Grundlage der bestehenden Fachliteratur kein eindeutiges Ergebnis hinsichtlich einer besseren Reproduzierbarkeit zwischen den Normalisierungsalternativen aufgezeigt werden. Ein entscheidender Unterschied besteht jedoch bei großen submaximalen Referenzkontraktionen der RVC-Methode, wodurch lange andauernde und damit für den Muskel ermüdende Übung durchgeführt werden müssen. MVC-basierte Messungen weisen eine Messdauer von i. d. R. maximal bis zu fünf Sekunden auf, sodass nach einer ausreichend langen Erholungszeit im Gegensatz zur RVC-Normierung keine Konsequenzen für die beteiligten Muskeln zu erwarten sind.

Die Normierung wurde nach den Versuchsreihen durchgeführt, um eine Ermüdung der untersuchten Muskeln, die durch Transfereffekte hervorgerufen werden, zu vermeiden. Weiterhin sind eine ausreichende Anzahl an Pausen sowohl während der Versuchsdurchführung als auch im Zuge der Maximalkraftmessungen vorzusehen.

Nach dem Export der Roh-Daten aus der Software „MR-XP 1.07 Master Edition“ der Firma Noraxon[®] erfolgten die zuvor beschriebenen Schritte der Gleichrichtung, Integration, Glättung und Normalisierung dieser Daten durch eigens entwickelte Matlab[®]-Skripte (siehe Anhang B). Die normalisierten Daten konnten schließlich mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms weiter ausgewertet werden. Diese Daten sind nach SCHLICK et al. (2010) nicht für allgemeingültige Bewertungen, sondern vielmehr für vergleichende Aussagen zwischen zwei Messungen verwertbar (vgl. KLUTH et al., 1997).

Die Oberflächenelektromyographie kann insbesondere bei der Messung relativ kleiner Muskelkräfte und daraus resultierender kleiner Spannungsamplituden durch Artefakte verfälscht werden und dadurch Messfehler generieren. Um eine bestmögliche Signalqualität generieren zu können, wurden die diesbezüglich nach STEINHILBER et al. (2013), KONRAD (2011), MÜHLEIB (2003) und KLUTH (1996) als besonders einflussreich geltenden Störungen bzw. Artefakte, die auf den Ausführungen von ZIPP (1988) beruhen, nach bestem Wissen und Gewissen beachtet:

- Frequenzkonstante Störungen
 - „Brumm“-Störungen, die Netzfrequenzen in das Messsystem einstreuen. Sie werden durch einen zu hohen Übertragungswiderstands aufgrund von falsch oder zu lang verlegten Elektrodenkabel ausgelöst.

- Durch induzierte Störspannungen oder externe elektrische Einstreuungen, die z. B. durch Smartphones oder Laptops erzeugt werden, können über elektrostatische bzw. elektromagnetische Felder Artefakte entstehen.
- Bewegungsartefakte
 - Durch die Bewegung des Muskels unter der Haut erfolgt eine Distanzänderung zwischen Muskeln und Elektroden, woraus eine Veränderung der Signalamplitude und damit Hautbewegungsartefakte resultieren können. Durch einen möglichst geringen Eingangsruhestrom an der Eingangsstufe des Differenzverstärkers, eine ausreichende Einwirkdauer der Elektrode bis zum Beginn der Messung und eine Vorbehandlung der zu messenden Hautstellen kann diese Veränderung des Hautpotenzials minimiert werden.
 - Eine auf die Grenzschicht zwischen Ableitmaterial und elektrolytischen Kontaktvermittler wirkende mechanische äußere Kraft (Zug oder Druck) erzeugt Elektrodenbewegungsartefakte in Form von Schwankungen des Elektrodenhalbzellenpotenzials. Zusätzlich besteht die Gefahr des Aufhebelns von zwei zu nah beieinander geklebten Elektroden. Formweiche, massearme Elektroden, wie bspw. Silber-Silberchlorid-Napfelektroden, tragen ebenso wie zugentlastete Ableitkabel, die verdrillt am Körper der Versuchsperson fixiert sind, zur Reduzierung der Störgröße bei. Zusätzlich dazu ist in Abhängigkeit der Elektrodenqualität und des Rauschens der Verstärker eine akkurate Vorbereitung und Kontrolle der Laborbedingungen zwingend erforderlich.
 - Triboelektrische Vorgänge im Ableitkabel, die aufgrund einer Relativverschiebung zwischen dem Zentralleiter, der Isolierung und dem Abschirmgeflecht entstehen, führen zu Kabelbewegungsartefakten. Die Verwendung abgeschirmter Ableitkabel mit einem artefaktarmen Aufbau und die Fixierung der Kabel am Körper tragen zu einer Reduzierung dieses Störeinflusses bei.
- Biologische Störspannungen
 - Die elektrische Aktivität räumlich benachbarter Muskeln kann einen Einfluss auf das messbare Signal der zu messenden Muskelstelle haben. Diese biologische Störspannung, die auch als „Crosstalk“-Effekt bezeichnet wird, wird durch das Übersprechen bioelektrischer Signale von verschiedenen Quellen innerhalb des Körpers der Versuchsperson hervorgerufen.
 - In Abhängigkeit von dem Gewebetyp und der -dicke variiert die Leitfähigkeit der Haut. Je dicker die Hautschicht ist, umso stärker verschlechtern sich die Impedanzbedingungen.

- Bei EMG-Aufzeichnungen in der Schulter- und Rumpfmuskulatur besteht die Gefahr der Aufzeichnung der elektrischen Herzaktivität. Die Wirkung des Störsignals (EKG-Signal) auf die OEMG-relevanten Kenngrößen hängt vom Verhältnis des Störsignals und des Nutzsignals (OEMG-Signal) ab.
- Reproduzierbarkeit elektromyographischer Aktivitäten
 - Durch die Anspannungsintensität sowie die Länge und Temperatur der Muskeln können die Eigenschaften des untersuchten Muskels häufig nicht konstant gehalten werden.
 - Ableitorte, deren Festlegung bzw. Fixierung auf anatomischen Bezugspunkten oder einer permanenten Markierung beruht, können neben der Vermeidung von eventuell auftretenden Schweißbrücken zwischen zwei oder mehr Elektroden die Reliabilität erhöhen.
 - Ein erfahrungsbasierter, sicherer und bewusster Umgang mit der Messsystematik trägt zu einer beanspruchungsadäquaten Erfassung elektromyographischer Muskelaktionspotenziale bei.

Im Rahmen der Studien wurden diese Aspekte daher mit besonderer Sorgfalt behandelt. Die Elektroden wurden in einem Abstand von zwei Zentimetern paarweise auf dem palpierbaren Muskelbauch parallel zum Muskelfaserverlauf platziert. STEINHILBER et al. (2013) weisen ergänzend darauf hin, dass das Kleben über motorischen Punkten aufgrund der erhöhten Signalinstabilität vermieden werden sollte. Die Haut wurde vor dem Applizieren der Elektroden von Trennschichten, die z. B. durch Cremes oder Unreinheiten o. Ä. entstanden, gesäubert, Haare entfernt und die betroffene Stelle mit einer abrasiven Reinigungspaste desinfiziert. Letzteres ist guten Impedanzbedingungen zugunsten der Entfernung toter Hautepithelien, Schmutz und Schweiß zuträglich (vgl. KONRAD, 2011). Neben der Anbringung sämtlicher Messelektroden auf den jeweiligen Muskelstellen wird zudem eine Bezugs- oder „Masse“-Elektrode auf Gewebe mit geringer myoelektrischer Aktivität appliziert. Sie vermindert Störsignale und schützt das Messgerät vor elektrostatischen Entladungen. Nach der Elektroden-Applizierung ist eine Überprüfung der Signalqualität unabdingbar.

Auf Grundlage von wissenschaftlichen Arbeiten (vgl. u. a. FRIEMERT et al., 2020; COMETTI et al., 2018; THEIS et al., 2016) und experimentellen Erkenntnissen aus Vorversuchen zum muskelphysischen Einfluss einer lose oder am Kopf befestigten Datenbrille wurden für die ergonomische Untersuchung die im Folgenden beschriebenen Muskeln ausgewählt.

Natürliche Kopfbewegungen und interaktionsbedingte Bewegungsabläufe bedingen, dass eine Vielzahl an Muskelstellen im Zuge der Nutzung eines HMDs aktiviert werden. Sämtliche als relevant befundenen Muskeln befinden sich im Schulter-Nacken-Bereich des Menschen. Die eingesetzte Messtechnik und die Untersuchungsmethode der OEMG weisen diesbezüglich jedoch Limitierungen auf. Bei einer eingeschränkten Anzahl möglicher eingehender Signale und gewünschter beidseitiger Beobachtung der Muskelpartien können also nur eine begrenzte Anzahl an Muskelstellen erfasst werden. Der Noraxon-Transmitter verfügt über acht Kanäleingänge, sodass insgesamt vier Muskelstellen links- und rechtsseitig aufgezeichnet werden können. Die OEMG erlaubt eine Beobachtung der an der Hautoberfläche liegenden Muskulatur. Der tief liegende und kleine Muskel *m. splenius capitis* trägt als intrinsischer Wirbelsäulenmuskel zwar wesentlich zur Bewegung von Kopf und Wirbelsäule bei, kann jedoch durch dessen Ausprägung und mit der beschriebenen Systematik nicht näher untersucht werden. Damit wird die Gefahr von biologischen Störspannungen bzw. eines Crosstalk-Effekts durch das Übersprechen benachbarter Muskelstellen eliminiert, die durch den Versuch der Ableitung des *m. splenius capitis* anhand der OEMG-Messsystematik entstehen könnten.

Unter Beachtung dieser Limitierungen wurden im Rahmen der Untersuchungen der *m. trapezius* und der *m. sternocleidomastoideus* für den Einsatz der OEMG selektiert, die für die Bewegungsabläufe im Zuge der Nutzung eines HMD von wesentlicher Bedeutung sind (siehe Abb. 7.12). Das Abgreifen der jeweiligen elektrischen Potenziale erfolgte dabei sowohl links- als auch rechtsseitig. Der *m. trapezius* gehört zur dorsalen Brustkorbmuskulatur und bedeckt den kranialen und dorsalen Hals sowie die Schultern. Der Muskel stabilisiert die Schulter und wird für die Drehung, Retraktion, Anhebung und Absenkung des Schulterblattes sowie die Anhebung des Schlüsselbeins aktiviert. Insgesamt setzt sich der *m. trapezius* aus drei Teilen zusammen: *pars descendens* (oberer bzw. absteigender Teil, siehe Abb. 7.13), *pars transversa* (querender bzw. mittlerer Teil) und *pars ascendens* (unterer bzw. aufsteigender Teil). Im Zuge der elektromyographischen Messungen wurden jeweils zwei Muskelstellen des *m. trapezius pars descendens* erfasst: im Nacken oder oberen Bereich und im unteren Bereich respektive Schulterbereich. Dieser verschiebt das Schulterblatt in kraniale Richtung bzw. in Richtung des Kopfes. Das Schulterblatt kann so gedreht werden, dass das Schultergelenk nach „oben“ zeigt und der untere Schulterblattwinkel in laterale, seitliche Richtung wandert. Außerdem streckt der Muskel die Halswirbelsäule und neigt sie zur gleichen Seite (vgl. VALERIUS, 2013).

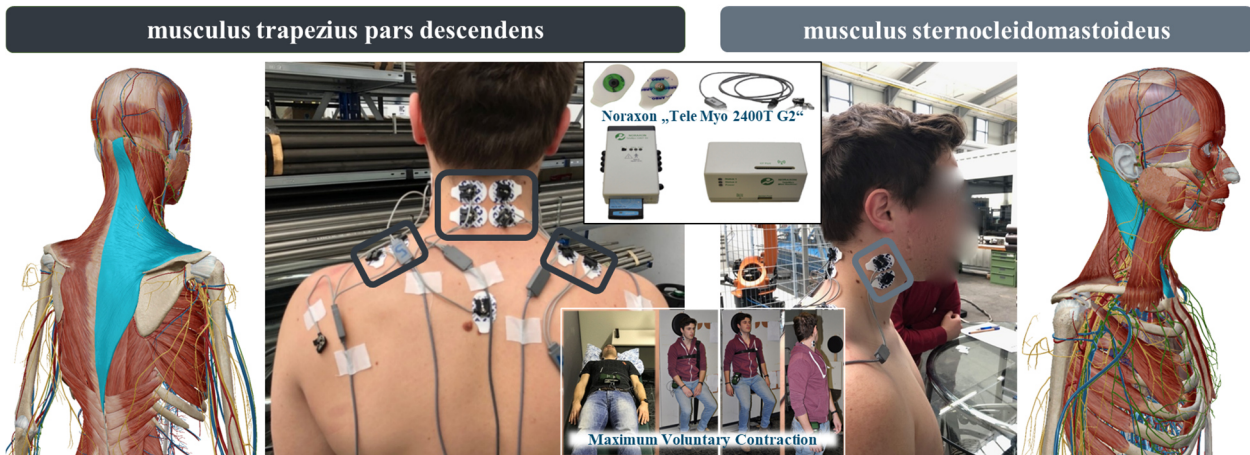


Abb. 7.12: Untersuchte Muskelstellen im Rahmen der Studie

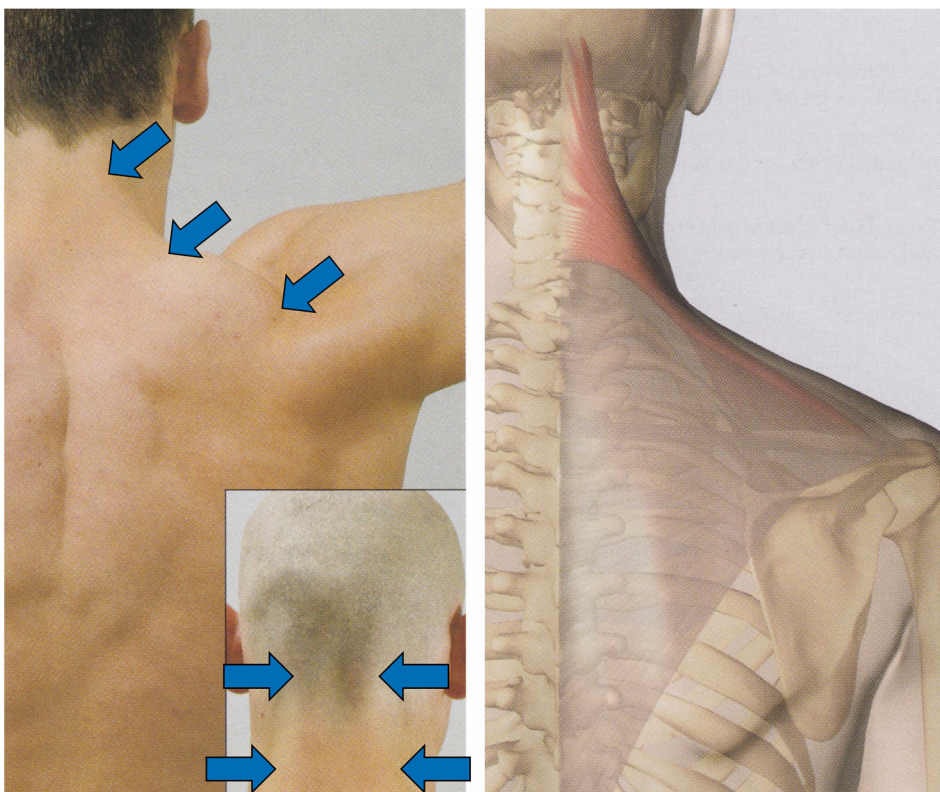


Abb. 7.13: *M. trapezius pars descendens* (VALERIUS, 2013)

Der *m. sternocleidomastoideus* ist Teil der Halsmuskulatur und wird häufig den lateralen Halsmuskeln zugeordnet (siehe Abb. 7.14). Er ist zweiköpfig und trägt zur Bewegung von Kopf und Wirbelsäule bei, indem er sie zur gleichen Seite neigt und sie bei einseitiger Anspannung zur Gegenseite rotiert. Bei beidseitiger Anspannung hebt sich die rotatorische Komponente auf. Während der Muskel bei gebeugtem Kopf Halswirbelsäule und Kopf zusätzlich beugt, streckt er bei gestrecktem Kopf beide (vgl. VALERIUS, 2013).

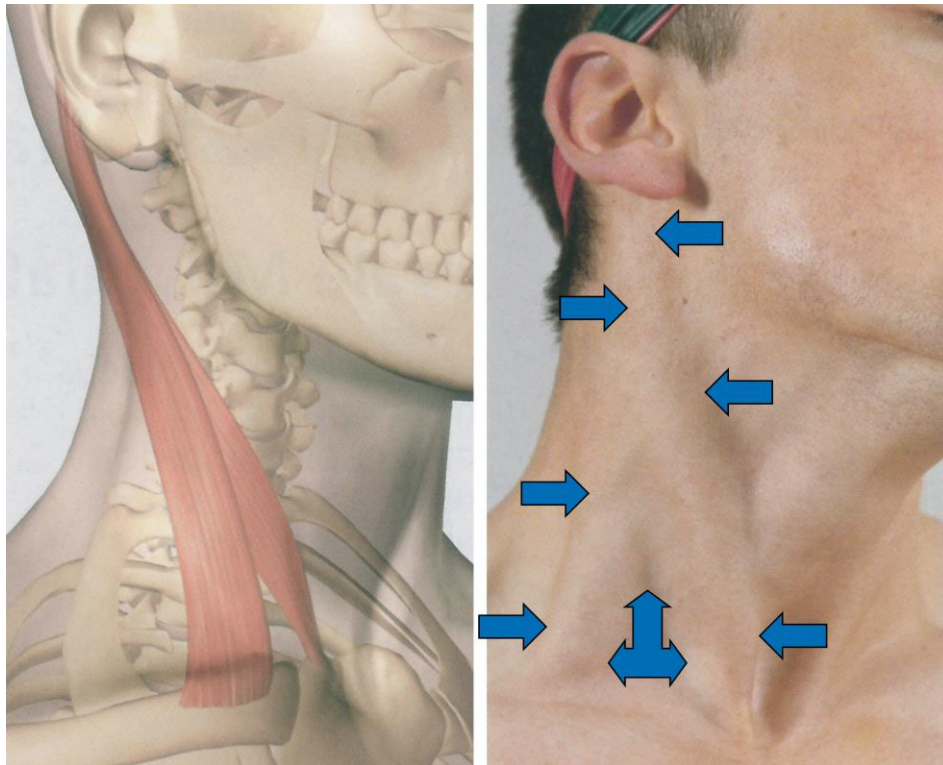


Abb. 7.14: *M. sternocleidomastoideus* (VALERIUS, 2013)

Eine Normalisierung bzw. Standardisierung der elektromyographischen Daten der untersuchten Muskulatur ist aufgrund der Vergleichbarkeit zwischen den Probanden unabdingbar.

Zu Beginn der Versuchsphase wurde zunächst eine Ruhemessung über einen Zeitraum von drei Minuten durchgeführt. Der Proband lag bei größtmöglicher Entspannung auf einer Liege flach auf dem Rücken mit seitlich neben dem Körper abgelegten Armen (siehe Abb. 7.15).

Innerhalb der Versuchsreihen wurden Beanspruchungswerte in Bezug auf die Maximalkapazität der zu betrachtenden Muskulatur für eine Dauer von ca. fünf Sekunden gemessen und u. a. mit den Erkenntnissen von ROHMERT (1960) zur Muskelermüdung abgeglichen. Bei der Abwägung dieses Anforderungsprofils erschien also grundsätzlich der Einsatz der MVC-Methode als besonders attraktiv. Allerdings ergibt sich durch die Anwendung dieses Normalisierungsverfahrens im vorliegenden Kontext eine Herausforderung: Die empfindlichen Strukturen des Schulter-Nacken-Bereichs bedürfen größter Aufmerksamkeit seitens der Versuchsleitung, um Verletzungsrisiken zu vermeiden. Durch die Priorisierung der Sicherheit für das Probandenkollektiv mussten mehrere mögliche Maximalkraftübungen in einer vergleichenden Betrachtung bewertet werden.



Abb. 7.15: Methode zur Erfassung der Ruheaktivität

Für den betrachteten m. trapezius pars descendens empfiehlt KONRAD (2011) entsprechend der Muskelfunktion eine kaudale, also zum Boden hinzeigende, Krafteinwirkung auf die Schulter des Probanden. Die Versuchsperson versucht gleichzeitig, seine Schultern gegen diese Kraft nach oben zu drücken (siehe Abb. 7.16).

Allerdings stellte sich im Rahmen der Voruntersuchungen heraus, dass bei menschlichem Einsatz zur Einleitung der Kraft keine zufriedenstellenden Ergebnisse hinsichtlich einer Maximalkraft erreicht wurden. Dieser Sachverhalt liegt darin begründet, dass der durch den Versuchsleiter aufzubringende Widerstand nicht starr und reproduzierbar war und die Maximalkraft somit nicht genau gemessen werden konnte. Der Einsatz von Hantelgewichten, die durch den Probanden bei anliegenden Armen in kraniale Richtung bewegt werden sollten, verbesserte zwar die Ergebnisse, allerdings erforderte die Ermittlung der individuellen Maximalkraft viel Zeit und war somit nicht praktikabel. Daher erfolgte schließlich der Einsatz einer Stuhlkonstruktion (siehe Abb. 7.17).



Abb. 7.16: Methode zur maximalen Beanspruchung des m. trapezius pars descendens ohne Einsatz von Hilfsmitteln



Abb. 7.17: Methode zur maximalen Beanspruchung des m. trapezius pars descendens mithilfe des Einsatzes einer Stuhlkonstruktion

Der Stuhl besitzt Individualisierungsmöglichkeiten bezüglich der Schulterbreite und -höhe der Versuchspersonen. Ein Gurt wird zur Maximalkraftmessung des „unteren“ m. trapezius pars descendens über die Schulter gelegt und mithilfe eines Klettverschlusses fixiert. Der Proband drückt nun seine Schultern gegen diesen Widerstand in kraniale Richtung. Die Ergebnisse ergaben zudem signifikant verbesserte Werte sowohl im Vergleich zu dem zuvor erwähnten menschlichen Einsatz zur Erzeugung des Widerstandes als auch zur Anwendung einer Hantel mit im Vorfeld ermittelten Maximalgewichten. Zur maximalen Aktivierung des Nackenbereichs wurde der Hinterkopf des Probanden in dorsale Richtung gegen die Kopfauflage des Stuhls gedrückt.

Am Beispiel des linksseitigen m. sternocleidomastoideus zeigt Abbildung 7.18 die nachfolgend beschriebene Übung zur Maximalaktivierung des m. sternocleidomastoideus.



Abb. 7.18: Methode zur maximalen Beanspruchung des m. sternocleidomastoideus

Eine geeignete Übung zur maximalen Kontraktion des m. sternocleidomastoideus wurde zunächst von RAVEN (2015) beschrieben. Hier wurde der Proband auf einer Liege mithilfe eines am Boden verankerten Stirnbandes fixiert, wobei die Verankerung durch an dem Stirnband befestigte Ketten realisiert wurde. Der Proband musste nun in Rücken- und Bauchlage seinen Kopf gegen

die Fixierung nach oben drücken. RAVEN (2015) bezieht sich bei der Festlegung der Versuchsbedingungen auf die Arbeiten von CAGNIE et al. (2007) und GEARY et al. (2013). Auch wenn diese Messmethode zu reliablen Werten führen kann, erscheint sie im Hinblick auf den arbeitswissenschaftlichen und nicht-medizinischen Hintergrund der Untersuchungen des Forschungsbestrebens unter den gegebenen Sicherheitsaspekten zu risikoreich. TAN et al. (2010) beschreiben hingegen ein geeigneteres Verfahren zur Bestimmung der maximalen Muskelaktivierung. Die Übung für die Probanden bestand darin, entsprechend der Beschreibung der Muskelfunktion den Kopf maximal zur Seite zu rotieren und so jeweils den entgegen der Blickrichtung liegenden Muskel maximal zu beanspruchen. Obwohl KONRAD (2011) bei Maximalkraftmessungen eine Fixierung des beteiligten Bewegungsapparates und den Druck gegen einen statischen Widerstand empfiehlt, erscheint die beschriebene Ausprägung der Messung gerade im Hinblick auf die Gewährleistung der Sicherheit für das Probandenkollektiv alternativlos, wenngleich vermeintlich ein Maximalaktivierungspotenzials des zu betrachtenden Muskels zu erwarten ist.

7.2.2.2 *Thermografische Messsystematik*

Zur Bewertung der Hautoberflächentemperatur am Kopfbereich wurden lediglich zur visuellen Unterstützung Wärmebildaufnahmen mit dem Thermografie-Messsystem FLIR[®] T250 erfasst (siehe Abb. 7.8). Um möglichst exakte und vergleichbare Messergebnisse erzielen zu können, wurden wesentliche Objektparameter festgelegt. Neben dem Abstand zwischen Kamera und Zielobjekt, der einen Meter betrug, wurden auch die relative Luftfeuchtigkeit und die Umgebungstemperatur (siehe Kapitel 7.1.2 und Kapitel 7.1.3) sowie der Emissionsgrad bestimmt. Letzterer gibt an, wie viel Strahlung von dem Zielobjekt ausgeht und nicht, wie viel Strahlung reflektiert wird. Die menschliche Haut weist einen Emissionsgrad von 0,98 auf. Mithilfe dieser Wärmebildkamera konnten etwaige Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich des Nutzers, die durch das Tragen des HMDs hervorgerufen werden können, und etwaige druckstellenbedingte Durchblutungsstörungen lokalisiert werden. Mithilfe der Software FLIR[®] QuickReport konnten auf Grundlage der Infrarotbilder Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperaturen für die jeweiligen Kopfbereiche visualisiert werden. Im Rahmen der Ergebnisbeschreibung wurde für eine (potenzielle) Kontaktstelle der Hautoberfläche mit der Datenbrille die probandenspezifische und bereichsbezogene maximale Oberflächentemperatur herangezogen. Dabei sollten insgesamt fünf Positionen des Kopfbereichs sichtbar gemacht werden: Stirn, Nase bzw. Nasenbein, links- und rechtsseitige Schläfe und Hinterkopf (siehe Abb. 7.19). Aufgrund der mit Haaren bedeckten Schädeldecke und der dadurch bedingten geringfügigen Wärmestrahlung wurde auf eine thermografische Aufnahme dieses Kopfbereichs verzichtet.

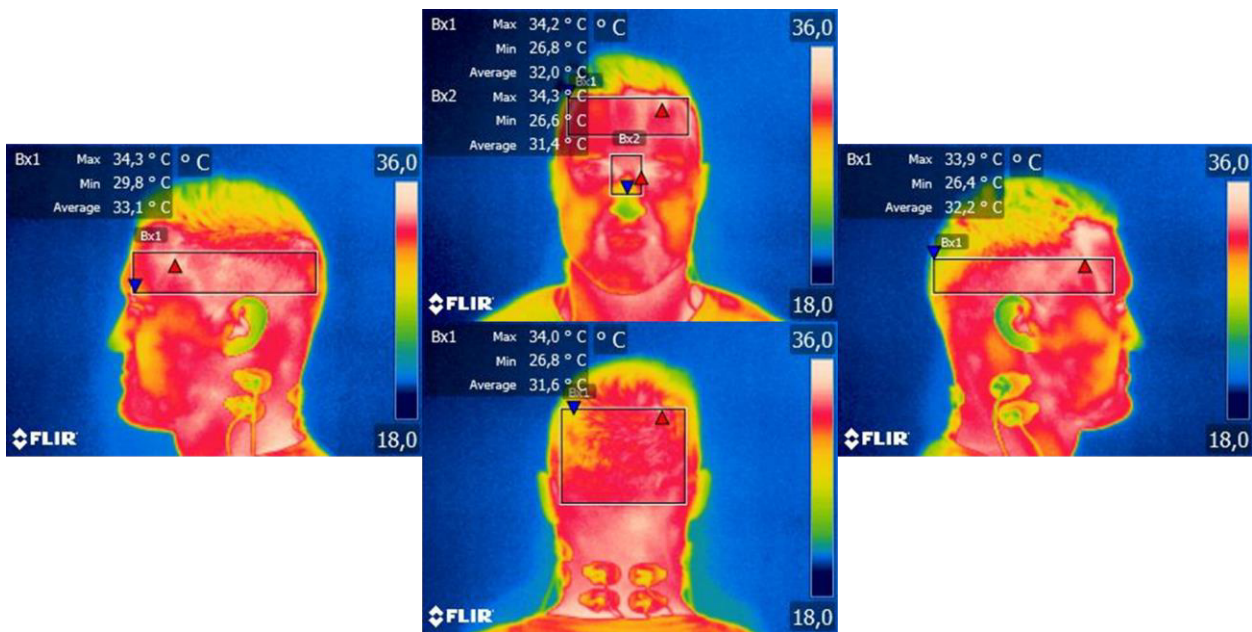


Abb. 7.19: Wärmebildaufnahmen des Kopfbereichs am Beispiel eines Probanden

7.3 Methoden zur Erfassung der subjektiven Wahrnehmung




Die für die empirische Feldstudie relevanten Methoden zur Erhebung qualitativer Daten wurden bereits im Rahmen der Beschreibung des Versuchsdesigns aufgeführt. Die subjektive Datenerfassung der experimentellen Studien setzte sich aus standardisierten Befragungen, spezifischen arbeitsaufgabenbezogenen Fragen und einem qualitativen bzw. semi-strukturierten Interview zusammen. Somit konnten aus Sicht der Probanden aussagekräftige Beurteilungen der jeweiligen Untersuchungsbedingungen ermöglicht werden. Sämtliche Fragebögen können Anhang C dieser Arbeit entnommen werden.

7.3.1 Organisation der Befragung

Gemäß BROMBACH (2005) und KLUTH & STRASSER (1998) wurde die Evaluierung der jeweiligen Versuchstätigkeit und möglicher Auswirkung mit einem strukturierten und standardisierten Fragebogen durchgeführt, um die befragten Personen stets mit den gleichen Fragestellungen in der gleichen Reihenfolge zu konfrontieren. Die so geschaffenen konstant kontrollierbaren Befragungsbedingungen verhelfen aufgrund der Vergleichbarkeit der Antworten zur Bildung von Hypothesen, zu einer quantitativen Auswertung sowie zur Anwendung statistischer Verfahren zur Ergebnisabsicherung. Gleichzeitig stellen sie sicher, dass unterschiedliche Antworten auch tatsächlich auf differente Meinungen der Befragten zurückzuführen sind (vgl. ANGER, 1969). Ein standardisierter Fragebogen ist im Gegensatz zu geringfügig standardisierten Verfahren zur Befragung zudem verlässlicher (vgl. SINGER, 1985). Allerdings findet der im Zuge der gesamten Forschungsarbeit angestrebte Mixed-Methods-Ansatz auch in den Teilstudien Anwendung. Mit

anderen Worten werden im Zuge der abschließenden Befragungen im Rahmen eines teilstrukturierten Interviews durch offene Fragen auch qualitative Aussagen der Probanden erfasst (siehe Tab. 7.15, #1), um den Informationsgehalt in Ergänzung zur quantitativen Datengewinnung zu maximieren (vgl. CRESWELL, 2014; BRYMAN, 2008).

Tab. 7.15: Beispiele zu den verwendeten Varianten der geschlossenen Fragen innerhalb des standardisierten Fragebogens

Befragungsart	#	Fragestellung	Antwortmöglichkeit
qualitative Frage	1	Inwiefern beeinflussen die unterschiedlichen Anwendungen Ihre Performance?	-
Alternativfrage	2a	Haben Sie bereits Erfahrungen mit Datenbrillen bzw. Head-Mounted Displays sammeln können?	ja / nein
	2b	Wenn ja, welche Geräte haben Sie wie häufig und in welchem Kontext genutzt?	Gerät(e): - Nutzungsdauer: h / Woche Verwendungszweck: -
Skalenfrage bzw. -aussage	3	Welchen körperlichen Fitnesszustand weisen Sie derzeit auf?	sehr schlecht ... mittelmäßig ... sehr gut
	4	Wie beurteilen Sie die Instruktionsdarstellungen?	   -4 (sehr schlecht) ... 0 (neutral) ... +4 (sehr gut)
	5	Ich liebe es, neue elektronische Geräte zu besitzen.	1 (trifft gar nicht zu) ... +3 (teils/teils) ... +5 (trifft voll zu)

Geschlossene Fragen tragen mit ihrer Vorgabe von Antwortmöglichkeiten zusammen mit einer visuellen Gesichter-Skala nach KUNIN (1955), die Ankreuzfehler vermeidet und die Erkennbarkeit positiver bzw. negativer Ausprägungen erleichtert, zu einem hohen Standardisierungsgrad bei (vgl. SCHNEIDER, 2009).

Bei einer Alternativfrage entscheidet sich der Befragte zwischen zwei Antwortmöglichkeiten einer einfachen Ausprägung, z. B. „Ja“ und „Nein“ (siehe Tab. 7.12, #2a) oder „Links“ und „Rechts“. Manche Fragestellungen bedingen ggf. eine weitere kurze Begründung oder Präzisierung (siehe Tab. 7.12, #2b).

Skalenfragen, bei denen mehr als zwei Antwortkategorien zur Auswahl stehen, fanden ebenso wie Katalogfragen, bei denen der Befragte zwischen qualitativ verschiedenen Antwortmöglichkeiten wählen kann, innerhalb des Fragebogens ihren Niederschlag (siehe Tab. 7.12, #3). Letztere sind nach LIKERT (1932) in Bezug auf eine mehrstufige Skala so formuliert, dass nur eine Antwortmöglichkeit zulässig ist. Durch die Skalenfragen bekundet der Befragte seine Zufriedenheit mit dem Fragengegenstand oder einem Statement mithilfe einer negativen oder positiven Antwort, bspw. durch eine bipolare Skala mit neun Skalenpunkten (z. B. „sehr schlecht“ (-4) über „neutral“

(0) bis „sehr gut“ (+4), siehe Tab. 7.12, #4) oder eine unipolare 5-stufige Skala (z. B. „trifft voll zu“ (5) über „teils/teils“ (3) bis „trifft gar nicht zu“ (1), siehe Tab. 7.12, #5).

Hinsichtlich der Formulierung der Fragen mussten praxisorientierte Regeln beachtet werden, die den Ausführungen von SCHEUCH (1967) und NOELLE (1963) folgen und von KLUTH (2001) zusammengestellt wurden. Danach sollten die befragten Probanden nicht überfordert und mehrdeutige Begriffe bzw. Formulierungen vermieden werden. Nicht-neutrale, ungehörige, zu private Fragen oder solche, bei denen aus bestimmten Gründen, wie bspw. Angst, der Wille zur wahren Beantwortung zweifelhaft erscheint, waren zu unterlassen.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Befragten absolute Anonymität genießen. Die Befragungssituation war dabei für alle Beteiligten stets gleich. Bei der Beantwortung der Fragen wurden sie stets durch den Studienleiter unterstützt. Diese Person fungierte auch als Interviewpartner mit dem Probanden. Somit konnten frühzeitig Unklarheiten ausgeräumt und die Richtigkeit des Fragebogens gewährleistet werden. Dabei war sich der Versuchsleiter der Verpflichtung bewusst, Neutralität zu bewahren, um keinerlei Einfluss auf die Befragten auszuüben. Gruppeneffekte wurden dadurch vermieden, dass die subjektive Einschätzung ausschließlich in Einzelgesprächen stattfand. Die Teilnahme an der Befragung erfolgte auf freiwilliger Basis in einem zeitlichen Rahmen von etwa 30 bis 45 Minuten.

Im Folgenden werden zusätzlich zu den organisatorischen Rahmenbedingungen der Befragung und den damit einhergehenden charakteristischen Instrumentarien weitere im Zuge der Studien herangezogene spezifische Fragebogensegmente vorgestellt. Diese erfragen neben personenspezifischen charakteristischen Angaben auch die physische und kognitive Beanspruchung der Probanden und gehen auch auf unterschiedliche Aspekte der Usability bzw. Benutzerfreundlichkeit ein. Die einzelnen Fragebögen wurden, mit Ausnahme der Abschlussbefragung, im Anschluss an die einzelnen Versuchsdurchführungen ausgegeben.

7.3.2 *Subjektives physisches Beanspruchungserleben*

Zusätzlich zu den messtechnisch erfassten Körperdaten wurden in Folge der Durchführung der Arbeitsaufgabe subjektiv empfundene physische Auswirkungen der einzelnen Muskelstellen sowie Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich erfragt.

Auf einer Skala von 0 (keine Beanspruchung) über 2 (starke Beanspruchung) bis 4 (unerträglich starke Beanspruchung) gaben die Probanden zunächst die während der Versuchsreihe wahrgenommene muskuläre Beanspruchung der beidseitigen Schulter-Nacken-Muskulatur an. Dieselbe Skalierung wurde zur Befragung der durch Druckstellen hervorgerufenen Wärmeempfindung im Kopfbereich herangezogen.

7.3.3 *Rating Scale of Mental Effort*

Der Fragebogen „Rating Scale of Mental Effort“ umfasst die Abfrage der mentalen Beanspruchung, die durch eine Arbeitsaufgabe hervorgerufen wird (ZIJESTRA, 1993). Diese wird zwischen 0 (absolut keine Anstrengung), 75 (erhebliche Anstrengung) und 150 (unerträgliche Anstrengung) skaliert. Da die Befragung keine Unterbrechung der Tätigkeit erfordert, kann die Befragung sowohl während des Versuchs als auch im Anschluss durchgeführt werden. So kann ein zeitlicher Verlauf der Beanspruchung wiedergegeben werden. Mithilfe von Beispielszenarien, wie z. B. ein „Fernsehabend mit dem Partner oder Freunden“ oder ein „Puzzle mit 500 Teilen“, wurde der Proband im Zuge der generellen Einführung mit dem Fragebogen zugunsten einer verbesserten Einordnung der Skala vertraut gemacht.

7.3.4 *NASA Task Load Index*

Der mehrdimensionale NASA-TLX-Fragebogen wird zur Messung der Arbeitsbelastung anhand von sechs Ratingskalen, d. h. der erlebten mentalen, physischen und zeitlichen Beanspruchung sowie der Leistung, Anstrengung und Frustration einer Person bei einer bestimmten Tätigkeit, herangezogen. Die Gesamtbeanspruchung wird als Anstrengung, die eine Person zur Ausführung einer Aufgabe aufgewendet hat, definiert (vgl. HART, 2006; HART & STAVELAND, 1988).

Die Methode setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zunächst bewertet der Proband anhand einer 20-stufigen bipolaren Ratingskala mit verbalen Deskriptoren (0: gering, 50: mittel, 100: hoch) die erlebte Beanspruchung in Bezug auf die sechs Skalen. Im zweiten Schritt wird die Wichtigkeit der sechs Subskalen durch einen Paar-Vergleich festgestellt. Dafür gibt der Proband bei den 15 einzelnen Paarkombinationen, z. B. körperliche Anforderung versus zeitliche Anforderung, die für sich anspruchsvollere Skala an. Dadurch ergeben sich die Gewichte für jede Subskala, welche mit den Subskalen-Ergebnissen multipliziert werden. Die Ergebnisse werden aufsummiert und durch die Summe der Gewichte (15) dividiert. Daraus errechnet sich ein gewichteter Gesamtwert für die erlebte Gesamtbeanspruchung.

7.3.5 *Visual Fatigue Questionnaire*

Der VFQ fragt anhand ausgewählter Symptome visuelle Belastungsfaktoren ab (vgl. BANGOR, 2000). Die ungewohnte Nutzung einer Datenbrille kann bei den Anwendern zur Ermüdung ihres visuellen Systems führen. Dieser Fragebogen hält auf einer Bewertungsskala (von 0 bis 100) Ermüdungskriterien fest. Insgesamt besteht der Fragebogen aus 16 Items respektive Symptomen: trockene, tränende, gereizte oder brennende und schwere Augen, Schmerzen in oder um die Augen, Schwierigkeiten hinsichtlich der Verfolgung von Linien und des „Scharfsehens“, springende

bzw. zitternde Texte, verschwommene Buchstaben, Blendung durch Lichter, Doppelsehen, Kopf- und Nackenschmerzen, Übelkeit sowie geistige Ermüdung. Es wird angenommen, dass durch den Fragebogen auffallende Signifikanzen im Idealfall auf genau ein Symptom zurückzuführen sind.

7.3.6 *Abschlussbefragung*

Um die Erkenntnisse aus den standardisierten Befragungen kanalisieren bzw. weiter spezifizieren zu können, wurden die Probanden mit geschlossenen Skalenfragen konfrontiert, die durch qualitative der Versuchspersonen ergänzt und somit zusätzlich als offene Frage beantwortet werden konnten. In der zweiten Teilstudie wurde, wie bereits im Zuge der empirischen Feldforschung, außerdem ein vollumfängliches semi-strukturiertes Interview durchgeführt. Nach deren Aufzeichnung erfolgte eine erneut mit der „Intelligent Verbatim“-Methode durchgeführte Transkribierung der 24 Interviews, die insgesamt 56.733 Wörter umfasste. Das Datenkonstrukt wurde ebenfalls mit der MAXQDA[®]-Software durch Kodierung respektive Kategorisierung einzelner Inhalte analysiert und ausgewertet. Die quantitativen und qualitativen Fragen zielten inhaltlich auf die (Rüst-) Aufgabe, das Unterstützungssystem und die (Rüst-)Applikation hinsichtlich dessen Nutzerfreundlichkeit bzw. Usability und technischen Ausstattung, ergonomische Interaktion und Trageeigenschaften, das Versuchsdesign und persönliche Aspekte ab, bspw. hinsichtlich etwaiger Verbesserungsaspekte oder strategischer Überlegungen im Zuge der Versuchsdurchführung.

7.4 Statistische Auswertungen

Mit der Erhebung empirischer Daten gehen eine Aufbereitung und anschauliche Darstellung der erfassten (Roh-)Daten einher, die einem wissenschaftlichen Standard entsprechend müssen. Die im Zuge der Teilstudien erfassten Werte erlauben ohne eine darauf aufbauende statistische Auswertung keine aussagekräftige Interpretation zu der Echtheit oder dem zufälligen Auftreten etwaiger Unterschiede zur Nutzung eines digitalen, am Kopf getragenen Unterstützungssystems im Vergleich zu einer Anwendung mithilfe von papierbasierten Instruktionen. Auf Grundlage einer deskriptiven, d. h. „beschreibenden“, Statistik können Untersuchungsergebnisse erst durch analytische bzw. induktive statistische Verfahren unter Berücksichtigung tolerierbarer Irrtumswahrscheinlichkeiten wissenschaftlich und statistisch abgesichert werden. An dieser Stelle sei zugunsten der Datenplausibilität erwähnt, dass einerseits „Missing Values“ respektive unvollständige Datensätze nicht festgestellt werden konnten und andererseits offensichtliche Daten-„Ausreißer“ bzw. Messfehler, die trotz der gewissenhaften Einhaltung einer bestmöglichen Signalqualität insbesondere im Zuge der OEMG-Messungen durch Bewegungsartefakte entstehen konnten, entfernt wurden.

Mithilfe der deskriptiven Statistik werden Daten bzw. Messwerte x_i oder y_i analysiert, die sich ausschließlich auf den erhobenen Datensatz beziehen, z. B. bei der Darstellung des Mittelwertes einer Variablen innerhalb einer untersuchten Stichprobe n . Das arithmetische Mittel respektive der Mittelwert M (Formel 7.3), der Median MD mit ungeradem (Formel 7.4a) oder geradem Stichprobenumfang (Formel 7.4b) und die Standardabweichung SD (Formel 7.5) mitsamt eines Erwartungswertes einer Zufallsvariable μ sind u. a. wichtige Parameter der deskriptiven Statistik (vgl. BORTZ & SCHUSTER, 2010).

$$M = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.3)$$

$$MD = \frac{x_{\frac{n+1}{2}}}{2} \quad (7.4a)$$

$$MD = \frac{1}{2} (x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}) \quad (7.4b)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n-1}} \quad (7.5)$$

Im Gegensatz zum Mittelwert wird der Median nur bedingt von Extremwerten beeinflusst. Werden innerhalb der Datenreihen „untypische Beobachtungen“ vermutet, wie bspw. im Rahmen der subjektiven Einschätzung der Probanden, kann der Median und seine robuste Charakteristik gegenüber Ausreißern herangezogen werden (BORTZ & SCHUSTER, 2010).

Eine über die Stichprobe hinausgehende Datenanalyse erfordert die Anwendung der induktiven bzw. „schließenden“ Statistik. Zum einen können die Ergebnisse der Teilstudien, d. h. die in einer Stichprobe erhobenen Daten, auf die Eigenschaften der Grundgesamtheit, also auf Nutzer im Umgang mit der HoloLens im Rahmen der Durchführung von einfachen Montagetätigkeiten, Blickpositionierungen oder Rüstprozessen, geschlossen werden. Zum anderen können stichprobenartig erhobene Daten theoretisch angenommene Eigenschaften einer Grundgesamtheit bestätigen. Für die vorliegenden ergonomischen Untersuchungen findet Letzteres Anwendung. Signifikanztests tragen unterstützend zur Verifizierung oder Falsifizierung der in Kapitel 6 beschriebenen Forschungshypothesen bei.

Die Verfahren und Vorgehensweisen, die nachfolgend beschrieben werden, beruhen auf klassischen Testtheorien (vgl. NEYMAN & PEASON, 1928a, 1928b; FISHER, 1925) und einschlägigen Hypothesen- und Signifikanztests (vgl. JANCZYK & PFISTER, 2013; KUCKARTZ et al., 2013; TIMISCHL, 2013; BORTZ & SCHUSTER, 2010; SACHS & HEDDERICH, 2009; CLAUB & EBNER, 1972; JOHN, 1979).

7.4.1 *Statistische Hypothesen*

Die Prüfstatistik soll feststellen, inwieweit sich Kennwerte aus zwei oder mehreren Stichproben aus einer oder mehreren Grundgesamtheiten nur zufällig oder generell unterscheiden. Dazu werden statistische Hypothesen aufgestellt, die wiederum aus Theorien bzw. inhaltlichen Hypothesen abgeleitet werden.

Zunächst wird eine statistische Nullhypothese H_0 formuliert, die von einem zufälligen bzw. nicht vorhandenen Unterschied der beiden Messreihen ausgeht. Die Mittelwerte der Kollektive sind auf eine Grundgesamtheit zurückzuführen. Die Alternativhypothese H_1 führt Unterschiede auf tatsächliche Differenzen in den Messreihen zurück. Letztere können zwischen gerichteten und ungerichteten Alternativhypothesen entscheiden. Während gerichtete Hypothesen die Richtung des Unterschiedes vorgeben, werden bei ungerichteten Hypothesen sowohl positive als auch negative Zusammenhänge akzeptiert. Bei den durchgeführten Studien ist durch die Anwendung der am Kopf getragenen Datenbrille einerseits davon auszugehen, dass aufgrund des Eigengewichts der Brille und der erforderlichen zusätzlichen und z. T. ungewohnten Interaktionen von einer größeren Beanspruchung seitens des Nutzers auszugehen ist. Allerdings sind durch die individuellen Ausprägungen und Empfindungen der Probanden sowie die durch neuartige Bewegungsabläufe entstehende Dynamik andererseits auch gegenteilige Abweichungen möglich.

Wenn als arithmetisches Mittel oder Stichprobenmittel bzw. der Erwartungswert μ_x und μ_y für die jeweiligen Beobachtungsreihen x_i (z. B. *sEA* oder die subjektiv empfundene Muskelbeanspruchung ohne Nutzung der HoloLens) und y_i (z. B. *sEA* oder die subjektiv empfundene Muskelbeanspruchung bei Nutzung der HoloLens) definiert sind, werden folgende Hypothesen aufgestellt:

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad (7.6)$$

$$H_1: \mu_x \neq \mu_y \quad (7.7)$$

Außerdem ist es möglich eine begründete Vorhersage zu treffen, die sich zunächst auf die Richtung des zu erwartenden Unterschieds bezieht, um sie in die Aussage der Alternativhypothese zu implementieren. Dies wird dadurch verdeutlicht, dass der Mittelwert bzw. Erwartungswert der zweiten Grundgesamtheit (hier: Beobachtungsreihe y_i) kleiner als ($\mu_x > \mu_y$) oder komplementär ($\mu_x < \mu_y$) zu dem Wert der ersten Grundgesamtheit (hier: Beobachtungsreihe x_i) ist. Die Nullhypothese nimmt all jene abweichenden Werte auf, die von der Alternativhypothese nicht betrachtet werden.

$$H_0: \mu_x \leq \mu_y \quad (7.8a)$$

$$H_1: \mu_x > \mu_y \quad (7.9a)$$

$$H_0: \mu_x \geq \mu_y \quad (7.8b)$$

$$H_0: \mu_x < \mu_y \quad (7.9b)$$

7.4.2 *Statistische Testverfahren*

Anhand einer Stichprobenuntersuchung, die mithilfe eines statistischen Testverfahrens erfolgt, und der daraus gewonnenen Befunde kann die Nullhypothese verifiziert und beibehalten oder falsifiziert und zurückgewiesen werden. Diese Entscheidung basiert auf der Berechnung einer Prüfgröße, die in Abhängigkeit differenter Annahmen (bspw. Normalverteilung der Rohwerte, große Stichprobe etc.) der jeweiligen Testverfahren unterschiedlich erfolgt. Die Annahmen sind notwendig, damit die Verteilung der Prüfgröße unter Beibehaltung der Nullhypothese bestimmt werden kann. Um zu entscheiden, ob ein kritischer Wert, der den Übergang zwischen Werten der Prüfgröße charakterisiert, mit der Nullhypothese (nicht) vereinbar ist, wird ein Signifikanzniveau festgelegt. Mithilfe eines statistischen Testverfahrens kann für jede Stichprobe eine Entscheidung zwischen den konkurrierenden Hypothesen getroffen werden. Allerdings kann diese Entscheidung richtig oder falsch sein. Sollte eine „richtige“ Nullhypothese aufgrund der Stichprobenauswahl bzw. der Ungewissheit der „wahren“ Verhältnisse einer Population zufällig abgelehnt und stattdessen eine „falsche“ Alternativhypothese angenommen werden, besteht ein Fehler 1. Art („Family-Wise Error Rate“). Der umgekehrte Fall, d. h. die fälschliche Beibehaltung der Nullhypothese, wird als Fehler 2. Art bezeichnet. Um statistisch abgesicherte Entscheidungen hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit und Qualität sowie zur Kontrolle des Fehlers 1. Art gewährleisten zu können, wird die Nullhypothese erst verworfen, wenn das Stichprobenergebnis eine Grenze über- oder unterschreitet. Dies erfolgt durch die Festlegung des Signifikanzniveaus α . Mit anderen Worten beschreibt α die Wahrscheinlichkeit, mit der die Zurückweisung der Nullhypothese im Zuge eines Signifikanztests zu einem Fehler 1. Art führt. Um ergänzend dazu die Bedeutsamkeit eines signifikanten Ergebnisses beurteilen zu können, werden z. B. mithilfe der Effektstärke d von Cohen (COHEN, 1988) oder durch den Korrelationskoeffizient r nach Pearson (HOEL, 1971) zusätzlich Effektgrößen bzw. -stärken bestimmt.

Im Zuge der Stichprobenanalyse ist die Alternativhypothese zu differenzieren. Sind die Abweichungen des wahren Mittels vom Hypothesenwert μ_0 in positive und negative Richtung von Inte-

resse, d. h. liegen ungerichtete Alternativhypothesen vor, wird ein zweiseitiges Testverfahren herangezogen. Sind die Abweichungen vom Mittel in nur eine Richtung entscheidend (gerichtete Alternativhypothese), wird ein einseitiger Test durchgeführt.

Die Art der statistischen Analyse hängt zunächst davon ab, ob durch eine Dependenzanalyse Unterschiede oder Zusammenhänge oder durch eine Interdependenzanalyse unterrichtete Abhängigkeiten untersucht werden sollen. Während das Ziel der Dependenzanalyse auf eine hypothesengestützte Strukturüberprüfung mithilfe von Signifikanztests ausgerichtet ist, soll die Interdependenzanalyse Datenstrukturen entdecken, bspw. durch Faktoranalysen zur Zusammenfassung von Variablen oder Clusteranalysen zur Gruppierung von Objekten bzw. Merkmalsträgern. Zur Untersuchung von Unterschieden zwischen zwei oder mehr Gruppen werden zentrale Tendenzen (bei nominal- und ordinalskalierten Merkmalen) respektive Mittelwerte (bei intervallskalierten Merkmalen), Varianzen oder Häufigkeiten bzw. Proportionen herangezogen, um je nach Voraussetzungen der Daten das entsprechende statistische Verfahren auswählen zu können. Sofern im Rahmen von Befragungen gewährleistet ist, dass die jeweilige Skala symmetrisch formuliert ist und die Skalenpunkte von allen Befragten als gleichabständig interpretiert werden, ist eine Ergebnisdarstellung sowohl in Form des Mittelwertes als auch durch den Median möglich. Die Verfahren werden nach Anzahl der vorliegenden Variablen, der Gruppenanzahl, der Abhängigkeit oder Unabhängigkeit der Stichproben und der Verteilung der Prüfgröße differenziert. Eine Übersicht der einzelnen Methoden kann Abbildung 7.20 entnommen werden.

Um den aus der Nutzung einer Datenbrille entstehenden Einfluss auf den Menschen untersuchen zu können, wurden Dependenzanalysen zur Unterscheidung von Mittelwerten oder zentralen Tendenzen genutzt. Im Zuge der jeweiligen experimentellen Studien wurde ein Probandenkollektiv mehrfach evaluiert und hinsichtlich eines Unterschiedes bei der Anwendung einer Papier-Instruktion und der Nutzung der HoloLens analysiert, d. h. es liegen verbundene bzw. abhängige Stichproben vor.

Die Überprüfung der Verteilung von Beobachtungsreihen kann sowohl grafisch als auch analytisch erfolgen. Zufallsbehaftete Variablen können in einem Intervall entweder jeden Wert (stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung) oder nur bestimmte Werte annehmen (diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung). Dieser Sachverhalt ist durch eine Verteilungsfunktion und eine Dichtefunktion beschreibbar, wie z. B. die Normalverteilung, t- oder z-Verteilung bzw. Standardnormalverteilung (vgl. u. a. BORTZ & SCHUSTER, 2010; GOSSET, 1908). Die Verteilungsfunktionen sind stetig, symmetrisch sowie glockenförmig, weisen einen Vertrauensbereich von $-\infty$ bis $+\infty$ auf und setzen angenähert normalverteilte Beobachtungsreihen voraus. Während die Normalverteilung durch den Erwartungswert μ oder die Varianz respektive Streuung σ^2 einer Zufallsvariable durch

$N(\mu, \sigma)$ beschrieben wird, ist die Form der t-Verteilung durch den Freiheitsgrad f festgelegt. Eine statistisch-mathematische Testung der Prüfgrößenverteilung kann durch den *Kolmogorov-Smirnov-Test (KS)* oder den *Shapiro-Wilk-Test (SW)* durchgeführt werden. Die Nullhypothese beider statistischer Testverfahren gibt eine Normalverteilung der Daten vor. Ein signifikantes Testergebnis führt bei einem Konfidenzintervall von 95 % dazu, dass die Nullhypothese verworfen und stattdessen die Alternativhypothese angenommen werden muss. In diesem Fall liegt keine Normalverteilung vor.

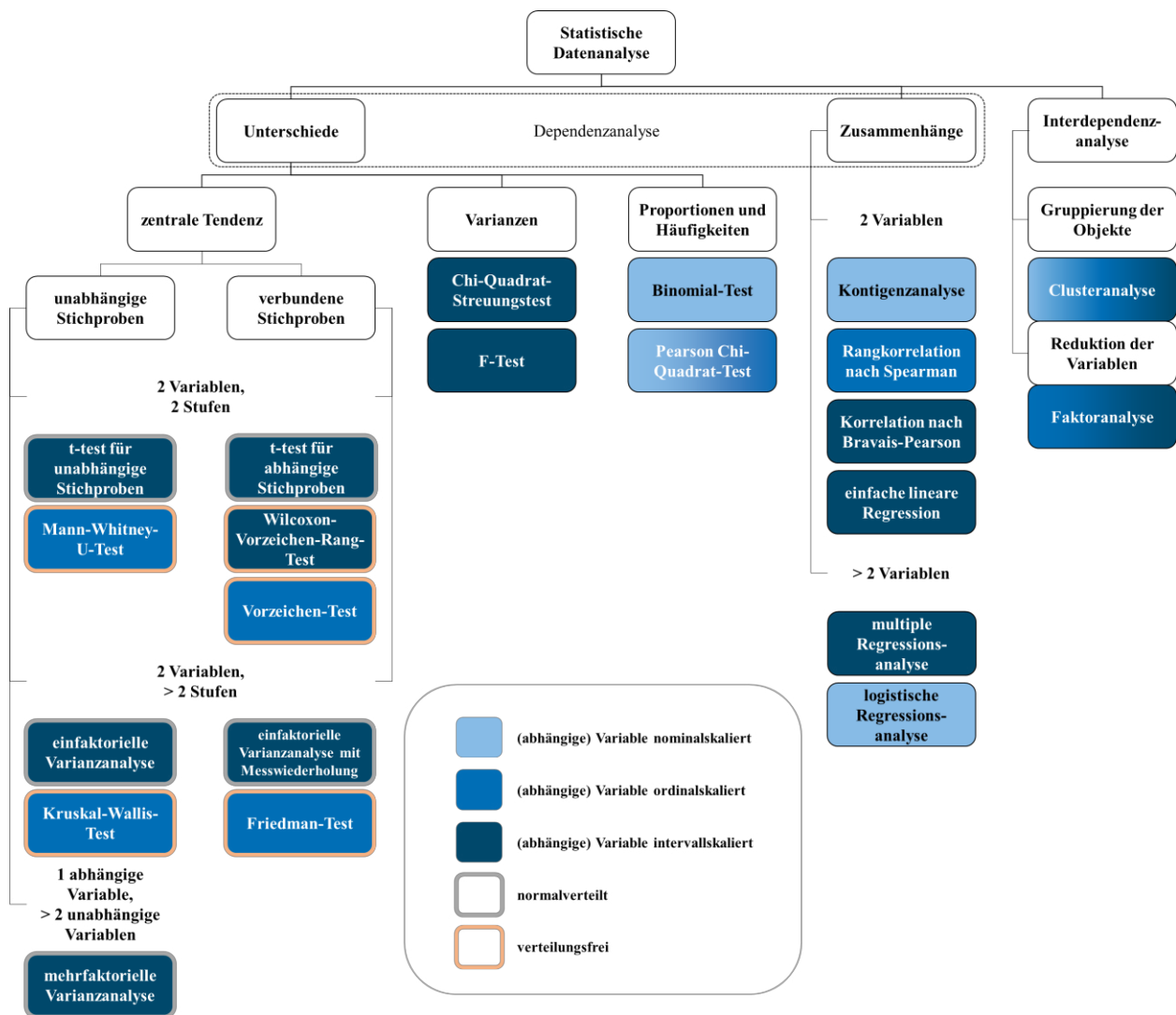


Abb. 7.20: Methodenauswahl zur statistischen Datenanalyse (modifiziert nach N.N., 2022b)

Im Falle einer Normalverteilung der Variablen wird der *t-Test für verbundene bzw. abhängige Stichproben* verwendet, um die statistische Signifikanz zweier Mittelwerte heranziehen zu können. Um den Test durchführen zu können, müssen drei wesentliche Voraussetzungen erfüllt sein (vgl. u. a. JANCZYK & PFISTER, 2013; KUCKARTZ et al., 2013; BORTZ & SCHUSTER, 2010). Zunächst müssen neben der Verbundenheit der Stichproben die untersuchte Variable oder die Mittelwerts-

differenzen, wie beschrieben, in den Grundgesamtheiten normalverteilt sein und durch ein Intervallskalenniveau charakterisiert werden können. Außerdem muss durch ein angemessenes Versuchsdesign sichergestellt werden, dass die Stichproben zufällig gezogen wurden.

Die Wahrscheinlichkeit der Annahme der Alternativhypothese H_1 steigt, obwohl in der Grundgesamtheit die Nullhypothese H_0 gilt, wenn eine oder mehrere dieser Annahmen nicht erfüllt ist. Obwohl der t-Test nach JANCZYK & PFISTER (2013) gegenüber Verletzungen der beschriebenen Voraussetzungen robust ist, wird insbesondere bei verteilungsfreien und ordinalskalierten Variablen sowie kleinen Stichproben der nicht-parametrische *Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test* genutzt.

Im Folgenden werden die u. a. im Zuge der Auswertung herangezogenen Prüfverfahren des t-Test und des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests theoretisch beschrieben und zum Ende des Kapitels anhand eines Beispiels verdeutlicht. Zum einen wird die Vorgehensweise des *Nullhypothese-Signifikanztests bzw. t-Test für abhängige Stichproben* beispielhaft an dem Beanspruchungsparameter der standardisierten muskulären Aktivität im Zuge der experimentellen Durchführung einer einfachen Montagetätigkeit erläutert. Zum anderen erfolgt die Beschreibung des nicht-parametrischen *Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests* am Beispiel der subjektiv empfundenen muskulären Beanspruchung im Zuge des in der zweiten Teilstudie vollzogenen Rüstprozesses einer Rotationszugbiegemaschine. Die Vergleiche erfolgen hinsichtlich der Anwendung der HoloLens zur Arbeitsausführung ohne HoloLens respektive mithilfe einer Papierinstruktion. Aus Gründen der Darstellbarkeit werden die vorangegangenen Überprüfungen zur statistischen Verteilung der Daten nicht explizit beschrieben. Die zugrundeliegenden analytischen Verfahren können u. a. den Arbeiten FIELD (2009) und AGRESTI & FINLAY (2008) entnommen werden.

Für das beschriebene Versuchssetting der zweiten Teilstudie liegen pro Versuchsabschnitt drei Bedingungen (Papier-Instruktion, HoloLens im fixierten Fenstermodus und HoloLens im variablen Fenstermodus) vor, sodass für eine inferenzstatistische Analyse multiple Tests durchgeführt werden müssen. Mittelwerts- oder Median-Unterschiede werden je nach Verteilungscharakteristik der Datenreihen i. d. R. im Anschluss an eine ein- oder zweifaktorielle Varianzanalyse (mit Messwiederholung) oder den Friedmann-Test durchgeführt. Diese stellen allerdings nur fest, ob Differenzen zwischen verschiedenen Gruppen bzw. Faktoren bestehen. Post-hoc-Tests geben anhand eines paarweisen Vergleichs Aufschluss darüber, welche spezifischen Gruppen bzw. Faktoren sich voneinander unterscheiden. Pro unabhängiger Variable respektive Auswertung werden maximal sechs ausgewählte Vergleiche herangezogen, deren Betrachtung aus kontextspezifischer Sicht sinnvoll ist, d. h. in Bezug auf Unterschiede innerhalb der Gruppe im Versuchsverlauf und hinsichtlich Differenzen pro Versuchsabschnitt. Die nachfolgend beschriebenen Testverfahren können somit unabhängig von einer Varianzanalyse angewendet werden bzw. ersetzen diese sogar

(vgl. u. a. LÜPSEN, 2014). Um eine in diesem Fall wahrscheinliche Inflation eines Fehlers 1. Art α' und damit einen Zufallsbefund zu vermeiden, wird im Sinne eines α -adjustierten Post-hoc-Testverfahrens eine Korrektur des Signifikanzniveaus vorgenommen. Mit der „Bonferroni“-Korrektur wird das Signifikanzniveau α auf ein entsprechend der Anzahl der durchgeführten statistischen Tests c angepasstes Niveau α_B gesenkt. Durch diese Korrektur kann die Wahrscheinlichkeit, einen Fehler 1. Art zu begehen, über alle durchgeführten Signifikanztests konstant gehalten werden. Die für die etwaigen Vergleiche innerhalb des ersten und zweiten Rüstabschnitts sowie zwischen diesen Versuchsdurchführungen zu erwartende „Family-Wise Error Rate“ in Höhe von 26,49 % berechnet sich bei einem angenommenen Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ (5 %) in Bezug auf jeweils sechs Testverfahren ($c = 6$) wie folgt:

$$\alpha' = 1 - (1 - \alpha)^c = 1 - (1 - 0,05)^6 = 0,2649 = 26,49\% \quad (7.10)$$

Um die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens des α -Fehlers zu verringern, passt die Bonferroni-Korrektur den zur Beurteilung der Signifikanz verwendeten α -Wert so an, dass

$$\alpha_B = \frac{\alpha}{c} = \frac{0,05}{6} = 0,0083 = 0,83\% \quad (7.11)$$

gilt.

Durch den Konservatismus der Bonferroni-Korrektur werden statistische Vergleiche unabhängig voneinander betrachtet. Wenngleich das Risiko eines falschen signifikanten Ergebnisses sinkt, steigt das Risiko, dass ein signifikanter Unterschied unentdeckt bleibt. Mit der Bonferroni-Holm-Korrektur (BHK) kann der beschriebene Effekt geschwächt werden. Die sogenannten „ p “-Werte (engl.: probability value) der statistischen Testverfahren werden zunächst ihrer Größe nach sortiert und mit den nach der Korrektur errechneten Grenzen verglichen, die sich aus dem Produkt der Anzahl der Hypothesentests und des ursprünglichen p -Wertes ergeben. Mit dem p -Wert oder dem „beobachteten“ Signifikanzniveau wird bei Gültigkeit der Nullhypothese die Wahrscheinlichkeit der beobachteten oder einer extremeren Prüfgröße ausgegeben, die mit der in der Alternativhypothese angenommenen Effektrichtung übereinstimmt. Die Bestimmung des asymptotischen (Signifikanzniveau auf Grundlage der asymptotischen Verteilung einer Teststatistik) oder exakten (exakte Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das beobachtete Resultat oder ein extremeres Resultat) p -Wertes erfolgt über den kritischen Wert der ermittelten Prüfgröße anhand der in Abhängigkeit des statistischen Testverfahrens zugrundeliegenden Verteilungsfunktion. Für die spezifische Berechnung der jeweiligen p -Werte werden mathematische Algorithmen genutzt, deren detaillierte Beschreibung den inhaltlichen Rahmen dieser Arbeit übersteigen würden und daher nicht gesondert aufgeführt werden. Sie können u. a. den Ausführungen von WRIGHT (1992) entnommen

werden. Die kleinste Referenz wird mit der einfachen Bonferroni-Korrektur bestimmt. Die darauf folgende Grenze entspricht der Korrektur, wenn ein Test weniger durchgeführt worden wäre (Formel 7.12).

$$p_{BHK} = p \cdot (c - 1) \quad (7.12)$$

Der größte p -Wert bleibt somit unverändert. Demzufolge weist die Bonferroni-Holm-Methode im Vergleich zur einfachen Bonferroni-Korrektur nicht weniger Hypothesen zurück. Dennoch verbleibt die Gesamtwahrscheinlichkeit, Fehler 1. Art zu begehen, bei oder unter einem Signifikanzniveau von 5 %.

t-Test für abhängige bzw. verbundene Stichproben

Mittelwertsunterschiede einer normalverteilten, intervallskalierten Variablen zwischen zwei verbundenen Stichproben können durch den t -Test untersucht werden. Erfolgt bei einem Stichprobenumfang n eine Messwiederholung zu unterschiedlichen Bedingungen oder „Treatments“, kann eine Differenz eines Messwertpaares d_i (x_A : erste Bedingung; x_B : zweite Bedingung, Formel 7.13) gebildet werden, um einen etwaigen Unterschied zwischen diesen beiden Bedingungen zu erfassen.

$$d_i = x_A - x_B \quad (7.13)$$

Der Mittelwert der Differenzen der gepaarten Beobachtungen \bar{d} errechnet sich nach Formel 7.14.

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n d_i \right) \quad (7.14)$$

Während sich die Standardabweichung der Differenzen s_d nach Formel 7.15 ergibt

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i^2 - \bar{d})}{(n - 1)}} \quad (7.15)$$

wird der Standardfehler des Mittelwertes $s_{\bar{d}}$ nach Formel 7.16 errechnet.

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - (\sum_{i=1}^n d_i)^2/n}{n(n - 1)}} \quad (7.16)$$

Die Prüfgröße t setzt sich aus dem Verhältnis der Mittelwerte der Differenzen zum Standardfehler des Mittelwertes zusammen (siehe Formel 7.17).

$$t = \sqrt{n} \left(\frac{\bar{d}}{s_d} \right) = \frac{\bar{d}}{s_{\bar{d}}} \quad (7.17)$$

Der Wert der Prüfgröße t wird mit dem ermittelten Freiheitsgrad f (siehe Formel 7.18) und der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α in Abhängigkeit der t-Verteilung (siehe Tab. D1, Anhang D) verglichen.

$$f = n - 1 \quad (7.18)$$

Für den t-Test für abhängige bzw. verbundene Stichproben berechnet sich die Cohen's Effektstärke d wie folgt:

$$d = \left| \frac{\bar{d}}{s_d} \right| \quad (7.19)$$

Die Nullhypothese H_0 gilt für die ermittelte Prüfgröße t als angenommen, wenn $|t| < t_{\alpha, f}$. Sie wird allerdings zurückgewiesen, sofern $|t| \geq t_{\alpha, f}$ zutrifft. In diesem Fall wird die Alternativhypothese H_1 angenommen.

Der Vorteil dieses statistischen Verfahrens liegt einerseits in der einfachen Handhabung und andererseits darin, dass eine Eliminierung möglicherweise auftretender interindividueller Varianzen erfolgt. Die unterschiedlichen individuellen Reaktionen der Probanden innerhalb der Beobachtungsreihen bedingen, dass Streuungen resultieren, die systematische Unterschiede verdecken können. Durch die Differenzbildung werden derartige Störstreuungen innerhalb einer Stichprobe verhindert. Die singuläre Abweichung der einzelnen Beobachtungsreihen von einer Normalverteilung wird dadurch entkräftet, dass die Differenz einer Normalverteilung genügen kann.

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für abhängige bzw. verbundene Stichproben

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test oder Rangsummentest ist das nicht-parametrische Äquivalent des t-Tests für abhängige Stichproben. Sofern die Voraussetzungen für ein parametrisches Verfahren nicht erfüllt sind, z. B. die Normalverteilung der Mittelwerts- bzw. Median-Differenzen, und die abhängige Variable metrisch- oder ordinalskaliert ist, wird dieser Test zugunsten einer höheren Teststärke angewendet (vgl. BORTZ & SCHUSTER, 2010). Nicht-parametrische Verfahren weisen geringere Anforderungen an die Verteilung der Messwerte in der Grundgesamtheit auf. Demnach ist der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ein verteilungsfreier Signifikanztest, der zwei abhängige Gruppen auf einen Unterschied hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz eines metrischen oder ordinalen Merkmals untersucht. Der Test ist auch mit erfüllten parametrischen Voraussetzungen durchführbar, wie bspw. mit metrisch- oder intervallskalierten Daten, allerdings zulasten einer geringeren Teststärke.

Der Signifikanztest überprüft, ob sich die Median-Differenz der Variablen (von Null) unterscheidet. Auf Grundlage der Differenzen der Messwertepaare werden Rangplätze gebildet. Demnach berücksichtigt die Testberechnung die absoluten Abstände zwischen den Differenzen nicht unmittelbar, sondern vielmehr deren Ordnung. Für jedes Messwertepaar werden zunächst die Beträge der Differenzen und das Vorzeichen der Differenz notiert. Diese absoluten Differenzen werden nun mit Rängen versehen, wobei mit der kleinsten Differenz begonnen und aufwärts nummeriert wird. Für Messwerte, die ggf. mehrfach erfasst wurden, werden verbundene Ränge gebildet. Dazu erfolgt eine Mittelwertbildung der mit identischen Werten versehenen Ränge. Nach der Rangzuordnung werden die positiven und negativen Rangplätze aufsummiert.

Die Rangsummen werden durch die folgende Beziehung beschrieben:

$$W_+ + W_- = \frac{n(n+1)}{2} \quad (7.20)$$

Dabei stellt die Prüfgröße bzw. Teststatistik T_+ die Summe der positiven Rangplätze von Paardifferenzen und T_- die Summe der negativen Rangplätze von Paardifferenzen dar. Beträgt die Differenz eines Datenpaares „0“, so wird dieses Paar von der Rangierung respektive von der Anzahl der von Null verschiedenen Paardifferenzen n ausgeschlossen. Sofern die Unterschiede der zentralen Tendenzen gering sind, nähert sich der Wert der Teststatistik W dem Erwartungswert μ_W für die Rangsummen unter Gültigkeit der Nullhypothese an.

$$W = \min(W_+; W_-) \quad (7.21)$$

$$\mu_W = \frac{n(n+1)}{4} \quad (7.22)$$

Um den berechneten Wert auf Signifikanz zu prüfen, wird die Prüfgröße mit einem kritischen Wert verglichen. Ist die Stichprobe nicht hinreichend groß ($n \leq 20$), gilt der kritische W-Wert (siehe Tab. D2, Anhang D) als Referenz für die Verwendung der exakten Signifikanz. Bei hinreichend großen Stichproben ($n > 20$) ist der kritische Wert asymptotisch normalverteilt. Der W-Wert kann nun z-standardisiert (Formel 7.23) und auf asymptotische Signifikanz geprüft werden, indem er mit dem kritischen Wert der standardnormalverteilten z-Verteilung (siehe Tab. D3, Anhang D) verglichen wird. Die Streuung bzw. der Standardfehler des W-Wertes σ_W , der für die Transformation des W-Wertes unter Berücksichtigung der Anzahl der Rangbildungen k und der Länge der i -ten Rangbildung t_i in einen z-Wert benötigt wird, errechnet sich anhand von Formel 7.24.

$$\sigma_W = \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1) - \sum_{i=1}^k \frac{t_i^3 - t_i}{2}}{24}} \quad (7.23)$$

$$z = \frac{W - \mu_W}{\sigma_W} \quad (7.24)$$

Der Korrelationskoeffizient r wird zur Beurteilung der Effektstärke nach Formel 7.25 berechnet.

$$r = \left| \frac{z}{\sqrt{n}} \right| \quad (7.25)$$

7.4.3 Festlegung des Signifikanzniveaus und Entscheidung zwischen den Hypothesen

Um anhand eines Grenzwertes zu entscheiden, ob eine Nullhypothese angenommen werden kann oder verworfen und entsprechend die Alternativhypothese gewählt werden muss, wird ein Signifikanzniveau bzw. eine Irrtumswahrscheinlichkeit α festgelegt. In Abhängigkeit der Bereitschaft der analysierenden Person hinsichtlich des Treffens einer Fehlentscheidung können bei dem Beschluss über die Gültigkeit der Nullhypothese unterschiedlich strenge Maßstäbe gesetzt werden. Typische in der Forschung für das Signifikanzniveau eines statistischen Testverfahrens festgelegte Werte sind $\alpha = 0,05$ (5 %) oder $\alpha = 0,01$ (1 %) (vgl. COWLES & DAVIS, 1982). In Abhängigkeit von der Irrtumswahrscheinlichkeit α werden die Signifikanzen nach Tabelle 7.16 kategorisiert und mit Symbolen gekennzeichnet.

Tab. 7.16: Klassifizierung der Signifikanzgrenzen nach dem p -Wert bzw. dem beobachteten Signifikanzniveau mit der zugehörigen symbolischen Kennzeichnung

beobachtetes Signifikanzniveau	Bezeichnung	Symbol
$p > \alpha = 0,05$	nicht signifikant	-
$p \leq \alpha = 0,05$	schwach signifikant	*
$p \leq \alpha = 0,01$	signifikant	**
$p \leq \alpha = 0,001$	hoch signifikant	***

Für $\alpha = 0,05$ (5 %) gilt, dass die jeweilige Aussage mit einer statistischen Sicherheit von 95 % zutrifft und als schwach signifikant bezeichnet wird ($\alpha \leq 0,05$). Bereits kleine Differenzen zwischen den Schätzwerten genügen, um eine Nullhypothese abzulehnen. Das Ergebnis ist hingegen nicht signifikant, wenn α einen Wert von 0,05 (5 %) überschreitet. Die Festlegung einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,01$ (1 %) impliziert, dass Entscheidungen auf einem Verlässlichkeitsniveau von 99 % gesichert sein sollen. Für eine Ablehnung sind demnach größere Differenzen zwischen den untersuchten Variablen erforderlich. Hypothesen, die mit dem beschriebenen Signifikanzniveau ($\alpha \leq 0,01$) ausgewiesen werden, sind signifikant. Eine hohe Ergebnissignifikanz liegt vor, wenn eine Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0,001$ festgelegt wurde. Die Zurückweisung der

Nullhypothese erfolgt nur bei sehr großen empirischen Kennwertunterschieden. Die Ergebnisse weisen zugunsten der Vermeidung einer Fehlentscheidung die größte Sicherheit zur Beurteilung einer Hypothese aus.

Bei einem festgelegten Signifikanzniveau von 5 % und einer damit einhergehenden Verwerfung der Nullhypothese bleibt jedoch offen, ob diese bspw. auch für $\alpha = 0,01$ (1 %) zurückgewiesen worden wäre. Daher wird das empirische Ergebnis mithilfe des p -Wertes auf einem anderen Signifikanzniveau überprüft. Sofern der p -Wert über dem gewählten Signifikanzniveau liegt, wird die Nullhypothese nicht verworfen. Ein Verwerfen der Nullhypothese und eine damit einhergehende Annahme der Alternativhypothese resultiert, wenn der p -Wert kleiner oder gleich der Irrtumswahrscheinlichkeit ist. Das Ergebnis bzw. die Differenz zwischen dem Mittelwert oder dem Median der Grundgesamtheit und dem hypothetischen Mittelwert oder Median gilt somit zum Niveau α als statistisch signifikant.

Um die praktische Relevanz von statistisch (nicht) signifikanten Ergebnissen verdeutlichen zu können, werden Effektstärken bzw. -größen bestimmt. Nach COHEN (1988) werden z. B. kleine, mittelgroße oder starke Effektstärken anhand von Cohen's d respektive dem Pearson-Korrelationskoeffizienten r wie folgt kategorisiert:

- kleiner bzw. schwacher Effekt: $0,2 \leq d < 0,5 \mid 0,1 \leq r < 0,3$
- mittelgroßer Effekt: $0,5 \leq d < 0,8 \mid 0,3 \leq r < 0,5$
- großer bzw. starker Effekt: $0,8 \leq d \mid 0,5 \leq r$

7.4.4 *Ausgewählte Beispiele zu statistischen Testverfahren*

Für sämtliche Berechnungen, welche die parametrischen Bedingungen zur Durchführung des **t-Tests für abhängige bzw. verbundene Stichproben** erfüllen, wird das nachfolgend beschriebene Beispiel exemplarisch aufgeführt. Dazu sollen die gemittelten standardisierten elektromyographischen Aktivitäten sEA des oberen rechten Teils des m. trapezius pars descendens der Probanden der ersten Teilstudie im Zuge der Montage des 27 Schritte umfassenden Lego-Bausatzes bei Nutzung der HoloLens (x_2) und ohne Anwendung der HoloLens (x_1) überprüft werden (siehe Tab. 7.17).

Tab. 7.17: Standardisierte elektromyographische Muskelaktivität (sEA, in %) für den oberen rechtsseitigen m. trapezius p. descendens im Zuge der Durchführung einer einfachen Montagetaätigkeit ohne (x_1) bzw. mit Nutzung des Unterstützungssystems (x_2)

Montageschritt	Muskelaktivität (sEA in %) des oberen rechtsseitigen m. trap. p. descendens (x_1)	Muskelaktivität (sEA in %) des oberen rechtsseitigen m. trap. p. descendens (x_2)	$d_i = x_1 - x_2$	$d_i - \bar{d}$	d_i^2
1	10,9	14,6	-3,7	4,4	13,7
2	1,8	2,2	-0,4	1,4	0,2
3	5,7	6,2	-0,5	1,2	0,2
4	9,7	11,2	-1,5	0,0	2,1
5	3,1	4,1	-1,0	0,4	0,9
6	3,6	5,0	-1,4	0,0	2,0
7	11,7	13,4	-1,7	0,0	2,8
8	4,3	5,5	-1,2	0,2	1,4
9	5,2	6,7	-1,5	0,0	2,3
10	2,7	2,7	0,0	2,6	0,0
11	3,3	4,8	-1,4	0,0	2,1
12	6,5	9,2	-2,8	1,4	7,7
13	3,6	3,7	-0,1	2,4	0,0
14	3,0	3,0	-0,1	2,4	0,0
15	5,5	9,9	-4,4	8,1	19,7
16	3,2	4,9	-1,7	0,0	2,9
17	4,1	5,8	-1,7	0,0	2,8
18	5,6	9,1	-3,5	3,6	12,1
19	4,0	6,0	-2,0	0,2	4,1
20	6,9	10,0	-3,1	2,3	9,7
21	2,7	3,0	-0,3	1,8	0,1
22	4,5	6,3	-1,7	0,0	3,1
23	6,0	8,5	-2,4	0,7	5,9
24	3,1	2,8	0,3	3,7	0,1
25	3,8	5,4	-1,7	0,0	2,8
26	5,0	7,4	-2,4	0,6	5,7
27	4,4	5,8	-1,4	0,1	1,8
M	5,0	6,6	-	-	-
SD	2,5	3,2	-	-	-

Um die Normalverteilung der getesteten Konstrukte überprüfen zu können, wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet. Der Test ergab, dass der in diesem Zusammenhang geltenden Nullhypothese zugestimmt werden kann und entsprechend beide Variablen einer Normalverteilung unterliegen ($KS_{x1} = 0,163$, $p_{x1} = 0,064$; $KS_{x2} = 0,162$, $p_{x2} = 0,067$). Mit den ermittelten Werten kann nun die Prüfgröße t errechnet werden:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_{\bar{d}}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n d_i)^2}{n_{\text{Schritte}}(n_{\text{Schritte}} - 1)}}} = \frac{\frac{-43,03}{27}}{\sqrt{\frac{106,1 - \frac{(-43,03)^2}{27}}{27(27 - 1)}}}} = \frac{-1,594}{0,231} = -6,893$$

Dadurch, dass $|t| = 6,893 > t_{\alpha, f=26} = 3,707$, wird die Nullhypothese H_0 abgelehnt und die Alternativhypothese H_1 mit einer statistischen Sicherheit von $1 - \alpha = 0,999$ angenommen ($p < 0,001$). Demnach hat die Anwendung der HoloLens ($M = 6,6\%$, $SD = 3,3\%$) im Vergleich zur Nicht-Anwendung der Datenbrille ($M = 5,0\%$, $SD = 2,5\%$) im Rahmen der Montagetätigkeit bei den insgesamt 12 Probanden einen hoch signifikanten Einfluss und weist zudem eine große Effektstärke auf ($d = 1,326 > 0,8$).

$$d = \left| \frac{\bar{d}}{s_d} \right| = \frac{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n d_i)}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i^2 - \bar{d})}{(n_{\text{Schritte}} - 1)}}} = \frac{\frac{-43,028}{27}}{\sqrt{\frac{37,527}{(27 - 1)}}} = \left| \frac{-1,594}{1,201} \right| = 1,326$$

Das Beispiel für den nicht-parametrischen **Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für abhängige bzw. verbundene Stichproben** bezieht sich auf die im Zuge des ersten Rüstabschnitts der zweiten Teilstudie subjektiv empfundene muskuläre Beanspruchung des oberen rechten Trapez-Muskels der 24 Probanden, die bei der Nutzung ohne (x_A) und mit HoloLens im variablen Fenstermodus (x_B) erlebt wurde. Die Anwendung des Tests beruht darauf, dass die Messwerte der Stichprobe nicht normalverteilt sind ($SW_{xA} = 0,616$, $p_{xA} < 0,001$; $SW_{xB} = 0,700$, $p_{xB} < 0,001$). Die ordinalskalierten abhängigen Variablen sowie die jeweiligen Berechnungswerte können Tabelle 7.18 entnommen werden.

Die Teststatistik W setzt sich nach Formel 7.21 wie folgt zusammen:

$$W = \min(W_+; W_-) = \min(14; 77) = 14$$

Tab. 7.18: Beanspruchungserleben für den oberen rechtsseitigen m. trapezius p. descendens im Zuge der Durchführung eines Rüstprozesses innerhalb des ersten Versuchsabschnitts bei Nutzung einer Papierinstruktion bzw. unter Anwendung der HoloLens im Tag-Along-Modus

Proband	Subjektiv empfundene Muskelbeanspruchung des oberen rechtsseitigen m. trap. p. descendens (x_A)	Subjektiv empfundene Muskelbeanspruchung des oberen rechtsseitigen m. trap. p. descendens (x_B)	$d_j = x_A - x_B$	Vorzeichen $vz(d_j)$	Absolutwert $abs(d_j)$	Rangwert Rg_i	Rangsumme $(vz(d_j) \cdot Rg_i)$	Positiver Rangwert W_+	Negativer Rangwert W_-
1	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
2	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
3	0	0	0						
4	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
5	1	1	0						
6	1	1	0						
7	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
8	1	2	-1	-1	1	7	-7		7
9	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
10	1	0	1	1	1	7	7	7	
11	1	1	0						
12	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
13	1	1	0						
14	0	0	0						
15	1	0	1	1	1	7	7	7	
16	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
17	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
18	0	0	0						
19	1	1	0						
20	0	0	0						
21	1	1	0						
22	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
23	0	0	0						
24	0	1	-1	-1	1	7	-7		7
MD	0	1	-	-	-	-	-	14	-
		Σ							77

Im vorliegenden Beispiel sind 13 der 24 Paardifferenzen von Null verschieden, sodass die übrigen von Null gleichen 11 Paare von der Rangierung ausgeschlossen werden. Sämtliche Ränge weisen eine absolute Differenz von „1“ auf, sodass Rang 1 bis 13 zur Bildung von verbundenen Rängen gemittelt werden $((1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10 + 11 + 12 + 13) / 2 = 7)$ und der Differenzwert entsprechend mit dem Rang 7 versehen wird. Nach der Rangzuordnung werden positive und negative Rangplätze notiert und aufsummiert.

Im vorliegenden Beispiel sind 13 der 24 Paardifferenzen von Null verschieden, sodass die übrigen von Null gleichen 11 Paare von der Rangierung ausgeschlossen werden. Sämtliche Ränge weisen eine absolute Differenz von „1“ auf, sodass Rang 1 bis 13 zur Bildung von verbundenen Rängen gemittelt werden $((1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10 + 11 + 12 + 13) / 2 = 7)$ und der Differenzwert entsprechend mit dem Rang 7 versehen wird. Nach der Rangzuordnung werden positive und negative Rangplätze notiert und aufsummiert. Für den Erwartungswert μ_W ergibt sich für einen nicht bestehenden Unterschied zwischen den Rangsummen folgende Berechnung:

$$\mu_W = \frac{n(n+1)}{4} = \frac{13(13+1)}{4} = 45,5$$

Die Stichprobe ist mit $n = 24$ hinreichend groß, sodass für die Prüfgröße W ein z-Wert berechnet wird, um diesen mit dem asymptotisch normalverteilten kritischen Wert der z-Verteilung zu vergleichen. Die Berechnung des Standardfehlers σ_W und des z-Wertes sind nachfolgend aufgeführt.

$$\sum_{i=1}^k \frac{t_i^3 - t_i}{2} = \frac{1}{2}((13^3 - 13)) = 1.092$$

$$\sigma_W = \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1) - \sum_{i=1}^k \frac{t_i^3 - t_i}{2}}{24}} = \sqrt{\frac{13(13+1)(26+1) - 1.092}{24}} = 12,619$$

$$z = \frac{W - \mu_W}{\sigma_W} = \frac{14 - 45,5}{12,619} = -2,496$$

Der empirisch ermittelte z-Wert ist größer als der für ein 5 %-Niveau des zweiseitigen Tests erwartete kritische z-Wert ($z = \pm 1,96$). Durch die Bonferroni-Holm-Korrektur und das adjustierte α -Level von 0,83 % erhöht sich der kritische Erwartungswert auf $z = \pm 2,64$. Die Hypothesentests für die subjektiv empfundene muskuläre Beanspruchung im Vergleich der Papierinstruktion mit der HoloLens-Anwendung im variablen Fenstermodus innerhalb des ersten Rüstabschnitts ergeben die folgenden korrigierten p -Werte:

- oberer m. trapezius pars descendens (linksseitig): $p = 0,011, p_{BHK} = 0,066$
- **oberer m. trapezius pars descendens (rechtsseitig): $p = 0,013, p_{BHK} = 0,066$**
- unterer m. trapezius pars descendens (linksseitig): $p = 0,206, p_{BHK} = 0,206$
- unterer m. trapezius pars descendens (rechtsseitig): $p = 0,096, p_{BHK} = 0,192$
- m. sternocleidomastoideus (linksseitig): $p = 0,021, p_{BHK} = 0,084$
- m. sternocleidomastoideus (rechtsseitig): $p = 0,034, p_{BHK} = 0,102$

Daraus kann schlussgefolgert werden, dass im Rahmen des ersten Rüstabschnitts hinsichtlich des Beanspruchungserlebens des oberen rechten Trapez-Muskels kein signifikanter und mit einem starken Effekt versehener Unterschied zwischen der Durchführung mit ($MD = 1$) und ohne Holo-Lens ($MD = 0$) festgestellt werden kann ($z = -2,496, p = 0,066, r = \left| \frac{z}{\sqrt{n}} \right| = \left| \frac{-2,496}{\sqrt{24}} \right| = 0,510$).

8 Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zeigen, dass neben dem „Workflow“- und wissensintensiven Charakter eines industriellen Rüstprozesses auch das Verhältnis dynamischer und statischer Prozesselemente mit mechanischen und nicht-mechanischen Arbeitsvorgängen für das Design eines in diesem Kontext einzusetzenden Unterstützungssystems von wesentlicher Bedeutung ist. Außerdem bestehen potenzielle Herausforderungen im Umgang oder bei der Interaktion mit digitalen Technologien während derartiger Tätigkeiten. Das darauf basierende Analyseergebnis resultiert schlussendlich in der Ableitung von Designimplikationen für ein AR-basiertes Assistenzsystem zur Unterstützung von Maschineneinrichtern, welche die Festhaltung und Aufbereitung respektive Präsentation von kontextspezifischem Erfahrungs- bzw. Fachwissen in Bezug auf industrielle Rüstvorgänge berücksichtigen. Im Rahmen der Designfallstudie und einem Mixed-Methods-Ansatz folgend wurden diese inhaltlichen Ausführungen um eine Evaluierung in natürlichen Umgebungen sowie um weitere qualitative und insbesondere quantitative Evaluierungen im Rahmen von experimentellen Teilstudien ergänzt. Letztere umfassten entsprechend Analysen in einer kontrollierten Umgebung und beinhalten vornehmlich quantitative Daten, die um einige qualitative Komponenten ergänzt wurden. Screening- und Detailverfahren verhelfen zunächst zu einer Abschätzung potenzieller Risiken oder Gefährdungen, die im Rüstkontext entstehen können. Die spezifischen Untersuchungen zielten darauf aufbauend auf eine ganzheitliche, objektive und subjekt-bezogene arbeitswissenschaftliche Analyse hinsichtlich der Nutzung eines AR-basierten Unterstützungssystems im Rahmen von Montage- bzw. Rüstvorgängen ab, welche die Durchführung von messtechnischen Verfahren und unterschiedlichen Befragungsinstrumente beinhaltete.

8.1 Wissensrelevanz in Bezug auf industrielle Rüstprozesse

Im Zuge der inhaltlichen Ausführungen dieser Ausarbeitung zu industriellen Rüstvorgängen konnte der wissensintensive Charakter dieser erfolgskritischen Prozesse bereits angedeutet werden. Im Folgenden werden spezifische Erkenntnisse über die Praktiken industrieller Rüstvorgänge und die daraus resultierenden Nutzeranforderungen vorgestellt. Diese Ergebnisse aus der ethnographischen Feldstudie bildeten die Grundlage für die Ausarbeitung von praxisbasierten Modellen für betriebliche Rüstprozesse, die Gestaltung einer cyber-physischen Unterstützungssystematik und die Durchführung ergonomischer Untersuchungen.

8.1.1 Charakteristik industrieller Rüstprozesse

Die Forschungsergebnisse bzw. die Analyse der Praktiken von Maschineneinrichtern legen nahe, dass industrielle Rüstprozesse in Bezug auf mechanische (z. B. Montage und Demontage der Werkzeuge) und nicht-mechanische (z. B. Interaktion mit der Nutzeroberfläche der Maschine) Arbeitsinhalte sowohl statische als auch dynamische Dimensionen aufweisen. Innerhalb des Rüstprozesses finden sich demnach wiederholende respektive reproduzierbare sowie sehr variable Arbeitsvorgänge wieder. Abbildung 8.1 stellt in diesen Zusammenhang die vier Tätigkeitsbereiche am Beispiel von rüstspezifischen Tätigkeiten unter Berücksichtigung ihrer Dokumentierbarkeit, Explizierbarkeit und Systematisierbarkeit dar.

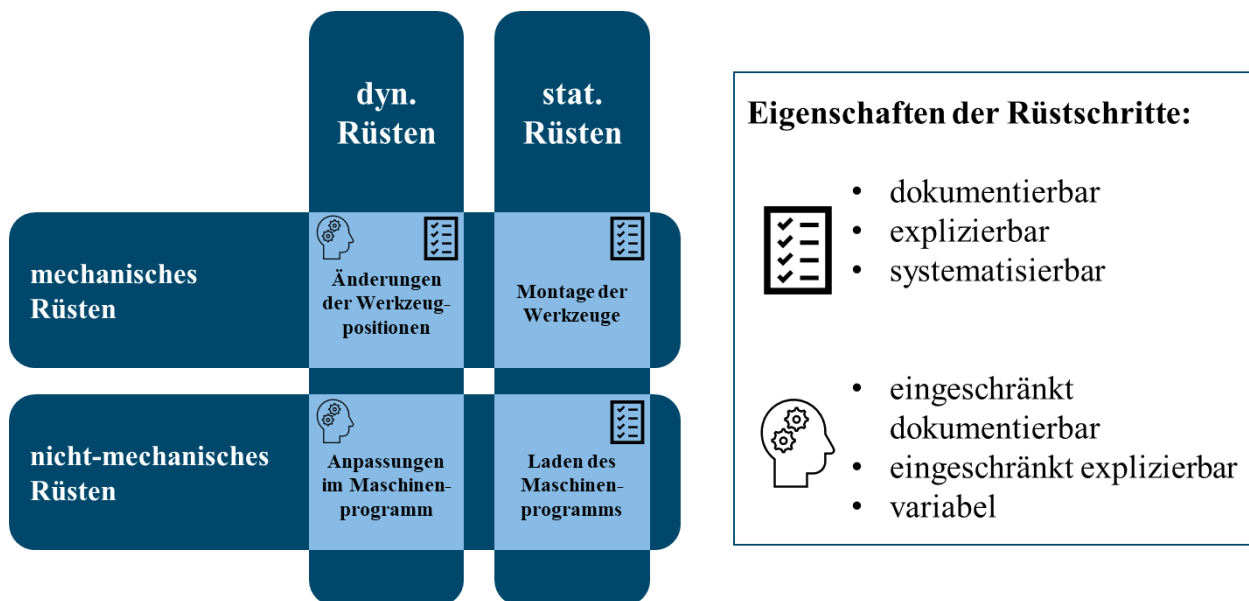


Abb. 8.1: Praxisorientiertes Modell für industrielle Rüstprozesse unter Berücksichtigung der mechanischen, nicht-mechanischen, dynamischen und statischen Tätigkeitsbereiche

Der mechanisch zu verrichtende Arbeitsanteil des Rüstprozesses umfasst z. B. die Montage und Demontage der Werkzeuge sowie etwaige Änderungen der Werkzeugpositionen. Nicht-mechanische Tätigkeiten werden bspw. im Zuge der Interaktion mit der Nutzeroberfläche der Maschine bzw. der Konfiguration des CNC-Maschinenprogramms ausgeführt.

Industrielle Rüstvorgänge können in insgesamt sechs voneinander abhängige Phasen oder Cluster unterteilt werden: *Vorbereitungsmaßnahmen des Rüstvorgangs (1)*, *logistische Tätigkeiten (2)*, *Rüsten von Werkzeug und Maschine (3)*, *Produktion des Bauteils (4)*, *Inspektion bzw. Prüfung des hergestellten Bauteils (5)* und *Iterationen innerhalb der Maschinensteuerung (6)*. Während die Vorbereitungs-, Logistik-, Produktions- und Inspektions- oder Prüf-Phase vornehmlich mit statischen Arbeitsanteilen behaftet sind, wird der Einrichtvorgang von Werkzeug und Maschine sowohl durch statische als auch dynamische Elemente charakterisiert. Demgegenüber sind Prüfvor-

gänge und Programmiterationen an der Maschine ausschließlich dynamischer Natur. Rüstvorgänge an Rotationszugbiegemaschinen können in Abhängigkeit der Maschinengröße, der Anzahl der zu verbauenden Werkzeuge, des Erfahrungsgrades des Maschineneinrichters und weiterer Einflussparameter, wie z. B. Arbeitsumgebungsbedingungen, Rüstzeiten in Höhe von 20 bis 120 Minuten annehmen. Abbildung 8.2 stellt beispielhaft zeitliche sowie statische und dynamische Arbeitsanteile der beschriebenen Phasen dar, die ein üblicher Rüstvorgang an einer Rotationszugbiegemaschine bis zur Serienfreigabe einnehmen kann. Im vorliegenden Fall wird insbesondere auf Grundlage der Analyse der Eye-Tracking-Aufnahmen von einer Durchführungsdauer von insgesamt 4.000 Sekunden oder 66,67 Minuten ausgegangen. Während 61,9 % der Tätigkeiten ein statisches bzw. reproduzierbares Profil einnehmen, sind 38,1 % dynamischen respektive variablen Ursprungs. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die jeweiligen Anteile aufgrund der beschriebenen Situationsparameter mitunter stark variieren können.

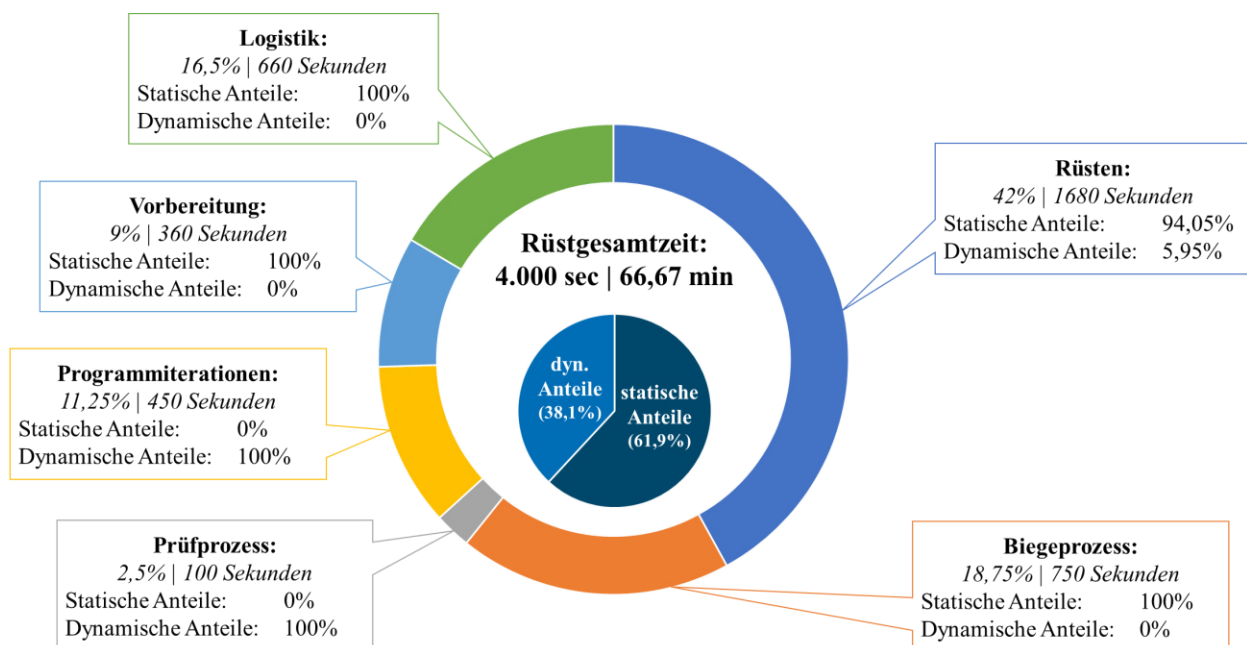


Abb. 8.2: Zeitliche sowie dynamische und statische Anteile der rüstspezifischen Arbeitsphasen

Der Zusammenhang der vorgestellten Cluster kann ergänzend dazu anhand der in Abbildung 8.3 dargestellten Systematik veranschaulicht werden. Um Maschinenstillstandzeiten zu reduzieren, müssen in der *Vorbereitungsphase* klare strategische Aktivitäten zu den Spezifikationen des Produktionsprozesses sowie zur Einplanung der vorhandenen Ressourcen, d. h. Halbfertigteile, Montagehilfsmittel, Werkzeuge sowie Maschinen- und Personalverfügbarkeit, festgelegt werden. Die Schwierigkeit dieses Vorhabens wird durch das folgende Zitat von *TN4* verdeutlicht:

„Einerseits muss der Bestand minimiert werden, indem die Produktion variabel gestaltet wird und viele Rüstvorgänge durchgeführt werden. Umgekehrt ist es wichtig, die Gesamtrüstzeiten durch wenige Rüstvorgänge gering zu halten.“

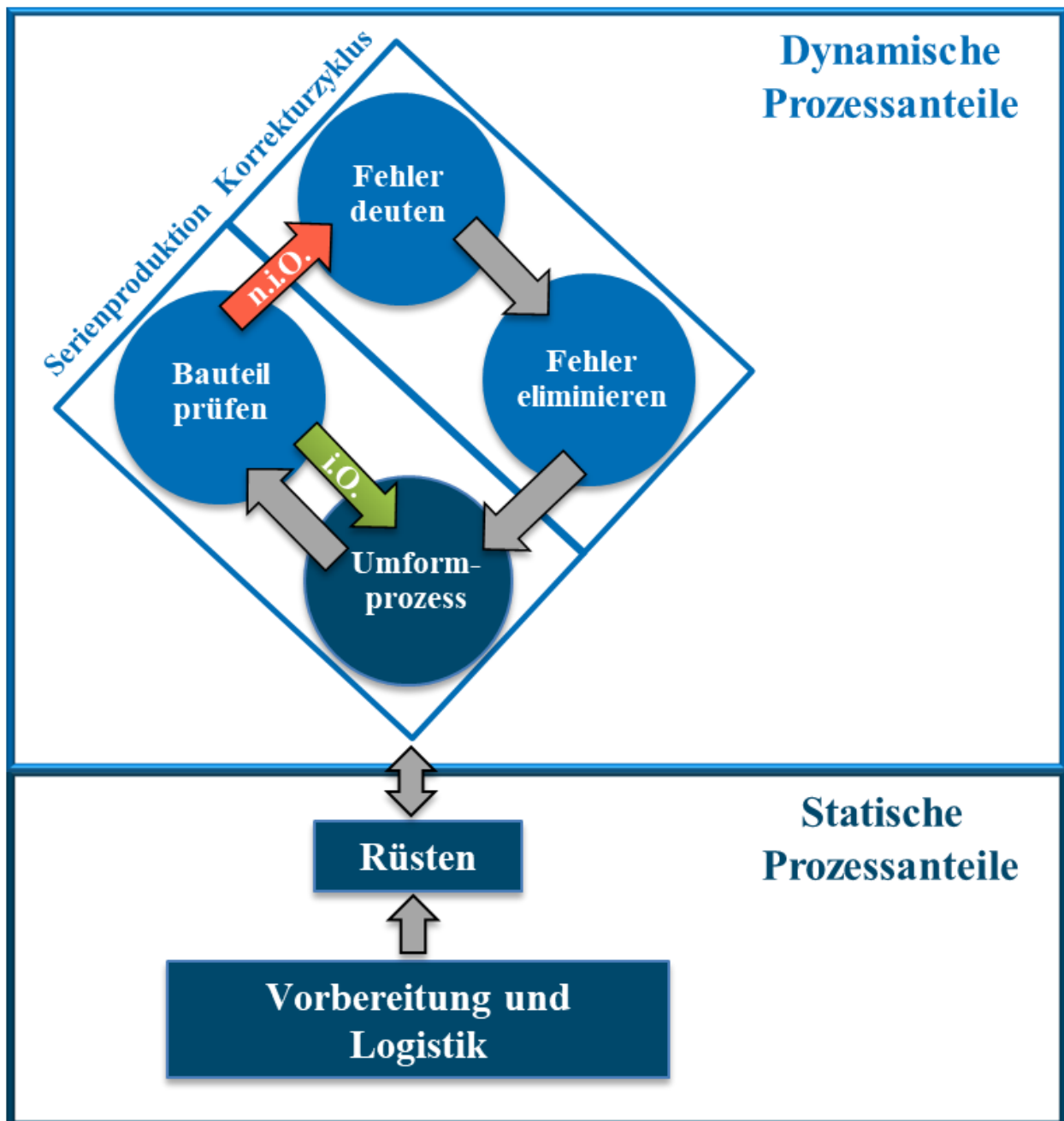


Abb. 8.3: Systematik eines industriellen Rüstprozesses

Dieses Cluster beinhaltet weiterhin das Verfahren der Maschine in die Werkzeugwechselposition inklusive des Ladens des artikelspezifischen Biegeprogramms an der Maschine. Während die Vorbereitung ausschließlich als externe bzw. nur bei Maschinenstillstand erfolgende Rüsttätigkeit ausgewiesen wird, kann die *Logistik* sowohl externe als auch interne, d. h. während der laufenden

Maschine durchzuführende Rüstaktivitäten beinhalten. Im Zuge dessen müssen Maschineneinrichter parallel zu sämtlichen Rüstphasen die artikelspezifischen Werkzeuge, Halberzeugnisse und Montagehilfsmittel an der zu rüstenden Maschine bereitstellen. Zusätzliche (und vermeidbare) Laufwege können allerdings zu Störungen einer geordneten Rüstreihenfolge und damit zu Rüstzeiterhöhungen führen.

In der Werkzeug- und Maschineneinrichtphase erfolgt der aus der Montage und Demontage unterschiedlicher, maschinenspezifischer Komponenten bestehende mechanische Rüstvorgang. Wie in Kapitel 2 und Kapitel 7.1.3 beschrieben, setzen sich diese Tätigkeiten aus Schraub- oder Steckverbindungen zusammen, die entweder per Hand oder mithilfe eines Montagehilfsmittels und Normteilen ausgeführt werden. Aus der Analyse wurde deutlich, dass mit zunehmender Komplexität der mechanischen Tätigkeiten das Know-how der Maschinenbediener für ein erfolgreiches und effizientes Rüsten entscheidend wird. Grundsätzlich qualifiziert das Wissen über den Rüstvorgang die Mitarbeiter, diese Tätigkeiten ohne weitere Einschränkungen durchzuführen. Die Ergebnisse deuten auf den Bedarf einer schrittweisen Anleitung bzw. Rüstinstruktion hin.

Die Phasen des *Umformprozesses*, des *Prüfvorganges* und der *Programmiterationen der Maschinensteuerung* gehen ineinander über. Die Produktionsphase stellt in Bezug auf den tatsächlichen Herstellungsprozess der Artikel keine inhaltlichen Herausforderungen dar. Vielmehr nimmt die Inspektion des Artikels durch Überprüfung der Bauteilqualität in Form einer optischen und taktilen (Lehren-)Messung am gefertigten Erzeugnis eine besondere Rolle ein. Etwaige geometrische Abweichungen nehmen unmittelbar Einfluss auf den Rüstvorgang und die anschließende Maschinenprogrammierung bzw. Programmiteration:

„Wenn das Teil nicht lehrenhaltig ist, muss ich in den Prozess eingreifen und Maschinenparameter ändern“ (TNI).

Nach der Fehlererkennung am Bauteil, wie z. B. Faltenbildungen am Innenbogen, Ovalisierungen oder Risse, muss zu deren Korrektur entweder eine mechanische Änderung von Werkzeugpositionen vorgenommen oder die entsprechende Zeile im Programmcode der Maschinensteuerung gefunden und in möglichst wenigen Iterationsschritten angepasst werden. Ein zeichnungsgerechtes und fehlerfreies Produkt kann durchaus mithilfe mehrerer bzw. unterschiedlicher Einstellungen zielführend sein, wie Abbildung 8.4 exemplarisch darstellt.

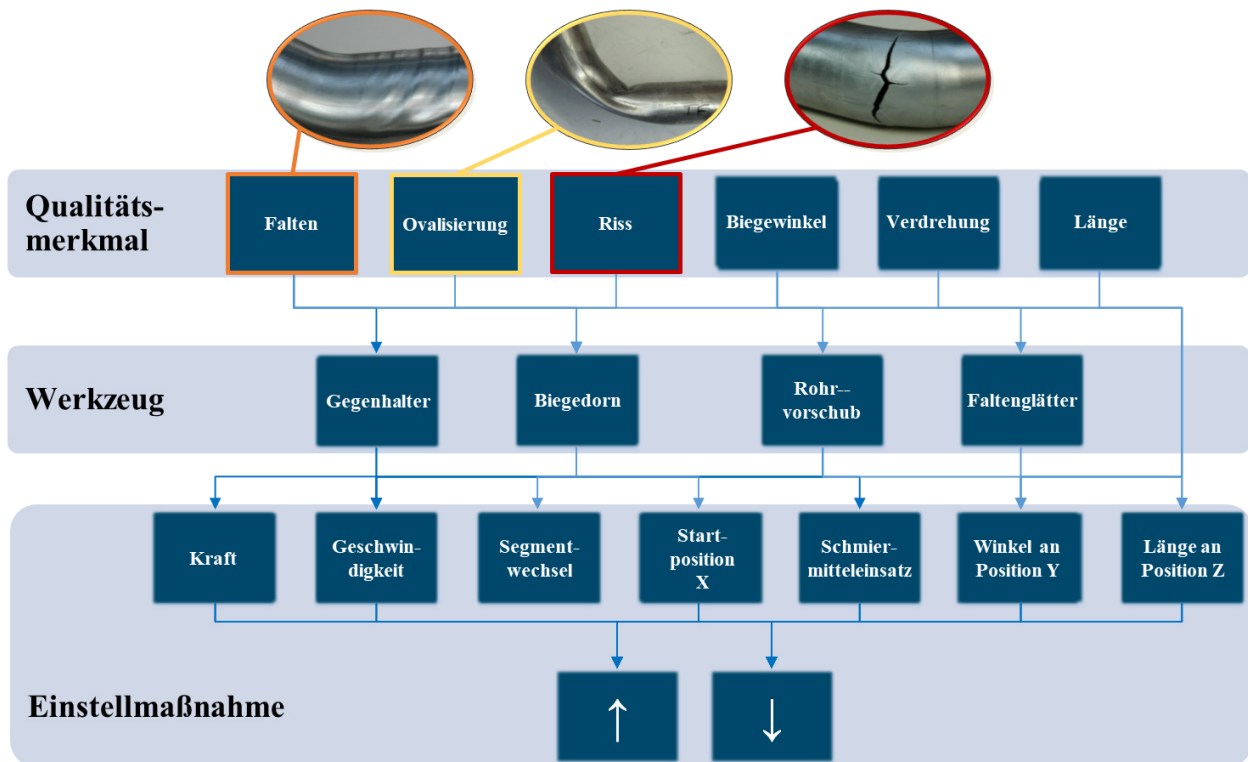


Abb. 8.4: *Werkzeugspezifische Entscheidungsmöglichkeiten bzw. zu priorisierende Einstellmaßnahmen zur Behebung unterschiedlicher Qualitätsmerkmale, z. B. „Falten“, „Ovalisierung“ oder „Riss“*

Der Maschineneinrichter ist demnach einem regelkreisähnlichen Prozess unterworfen. Basierend auf dem artikelspezifischen Arbeitsauftrag inklusive der bauteilgerechten Zeichnung zieht er einen Vergleich zwischen Soll- und Ist-Wert des Fertigteils und ermittelt auf Grundlage dieser Werte selbständig die anzupassende Stellgröße, die im besten Fall zu einer verminderten Regelabweichung führt. Abweichungen werden durch Störgrößen hervorgerufen, die i. d. R. vielfältig und nicht vollumfänglich erfassbar sind. Neben Umwelteinflüssen, wie z. B. variierende klimatische Bedingungen, können auch durch unterschiedliche Spezifikationen der Halbfertigteil-Chargen schwankende Materialparameter resultieren. Weiterhin nimmt das tribologische Verhalten der Maschine, der Werkzeuge oder des Materials Einfluss auf den Prozess. Nicht zuletzt kann auch der Maschineneinrichter selbst durch individuelle Vorgehensweisen Störgrößen hervorrufen, die durch die Veränderung eines Parameters – bspw. an einer Biegestelle – Verbesserungen erzielen, an einer weiteren Biegestelle jedoch neue, unbekannte Fehler auslösen.

Für derartig komplexe Vorgänge ist die Darstellung von unterstützenden und simulationsbasierten Informationen sinnvoll. Sofern für komplexe Geometrien und starke Materialabhängigkeiten keine analytischen bzw. mathematischen Lösungen existieren, können Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) die Möglichkeit einer näherungsweise theoretisch und numerisch fundierten Lösung bieten.

8.1.2 *Abhängigkeit von Wissen*

Während einige Rüstschritte, wie bspw. die Montage des Faltenglätters, aufgrund ihrer einfachen und schnellen Erklärbarkeit – z. B. mithilfe von Checklisten – dokumentiert und damit systematisiert sowie expliziert werden können, sind es wiederum andere nicht. Letzteres liegt insbesondere daran, dass Maschineneinrichter ihre Handlungen aufgrund vermeintlicher Banalität oder einer zu hohen Variabilität oder Komplexität nicht artikulieren können. Die Komplexität des Werkzeugwechsels ist insbesondere durch die Anzahl der zu wechselnden Komponenten sowie durch die Werkzeugzusammensetzung des vorherigen Fertigungsauftrages bestimmt. Außerdem beschreiben Rüstanleitungen oftmals nicht die exakte artikelspezifische und entsprechend maschinengebundene Montage- und Demontageoperation des jeweiligen Werkzeuges. Schlussendlich wird ersichtlich, dass der Prozess hochgradig vom Wissen der Maschineneinrichter abhängig ist. Das Rüsten kann in Abhängigkeit der Komplexität des Rüstvorgangs und der Maschinengröße von einer einzelnen Arbeitsperson oder von zwei oder mehr Maschineneinrichtern durchgeführt werden. Wissenstransferprozesse treten in dem beschriebenen Einrichtungsszenario insbesondere bei einzeln durchgeführten Arbeitsvorgängen deutlicher hervor als bei kollaborativen Rüstvorgängen.

Die Literatur weist bereits darauf hin, dass das in diesem Kontext beschriebene Wissen sowohl sehr individuell sein kann als auch sehr schwer zu erfassen und zu teilen ist (vgl. NONAKA et al., 2000; RANDALL et al., 1996). Die Notwendigkeit, einen Wissenstransfer innerhalb der Belegschaft bzw. der Kollegen zu initiieren, wird u. a. durch das folgende Zitat bekräftigt:

„[...] Es fehlt einfach die Dokumentation, sodass das Wissen hauptsächlich „im Kopf“ der einzelnen Mitarbeiter bleibt. Wenn heute drei Mitarbeiter das Unternehmen verlassen und morgen drei neue eingestellt werden, dann ergibt sich ein massives Problem“ (TN4).

Unerfahrene Mitarbeiter sind davon besonders betroffen. Eine einfache Weitergabe von Wissen stellt durch dessen Vielfältigkeit allerdings eine besondere Herausforderung dar (vgl. ACKERMAN et al., 2013; RANDALL et al., 1996; NONAKA, 1991). Weiterhin kann die persönliche Übermittlung von Wissen einerseits belastend sein („Auf Dauer ist das anstrengend. Ich musste jeden Schritt erklären, was er machen soll.“, TN14) und andererseits ein persönlich empfundenes Alleinstellungsmerkmal gefährden. Unabhängig davon hat sich die gemeinsame Nutzung von Wissen und Expertise als erfolgskritische Grundlage für die Verteilung von Ressourcen herausgestellt. Für eine nutzerzentrierte Konzipierung muss eine Systematik, die für den Wissensaustausch genutzt werden soll, neben einer aktuellen Dokumentation insbesondere verschiedene Informationsformate bereitstellen und dabei dem Prinzip des verkörperten Wissens folgen. Umfassendes Verständnis hinsichtlich der Handhabung bestimmter Arbeitsaufgaben kann erst sichtbar gemacht werden,

wenn es in Aktionen beobachtet wird. Die damit einhergehende Komplexität der Wissenserfassung und -weitergabe verlangt nach innovativen Lösungen (vgl. NONAKA, 1991). CPPS können, ohne dass Wissen in propositionales Wissen übersetzt werden muss, Wege bieten, über die das durch Handlungen verkörperte, rüstspezifische Wissen erfasst und dargestellt werden kann.

8.1.3 *Wissenstransfermodell im Rahmen industrieller Rüstprozesse*

Mit prozessspezifischen Modellen, wie das von SHINGO (1985) entwickelte SMED-Modell, kann ein Lernprozess zusätzlich und aktiv unterstützt werden. Rüstvorgänge weisen allerdings insbesondere hinsichtlich der angewendeten Praktiken eine weitaus komplexere Struktur auf. Das auf empirischen Daten beruhende Wissenstransfermodell, das in Abbildung 8.5 schematisch dargestellt und dessen wesentliche Elemente nachfolgend beschrieben werden, wurde entwickelt, um den Fortschritt und die Umsetzung neuer und innovativer Technologien zu unterstützen. Es stellt die empirisch erhobenen Daten unter besonderer Berücksichtigung der Wissensträger und -empfänger in einem situativen und organisatorischen Kontext dar. CPPS können in Form unterschiedlicher (sensorischer) Endgeräte (z. B. AR-Datenbrillen, 3D-Kameras, Simulationsprogramme etc.) und Schnittstellen (z. B. CAD, OPC UA, WebSocket etc.) Informationen automatisch erfassen, verarbeiten und zu konsumierbarem Wissen aufbereiten.

Die Handlungen und Eigenschaften respektive Fähigkeiten der Wissensakteure sind für die Qualität des Wissenstransfers von wesentlicher Bedeutung. Dabei ist entscheidend, auf welche Art und Weise Wissen dargestellt und dokumentiert sowie in welchem situativen Kontext es transferiert wird. Letzteres umfasst neben der Qualität der dem Prozess zugrunde liegenden Werkzeug- und Materialparameter insbesondere die Rüstperformance bzw. praxisorientierte Fähigkeiten der Einrichter sowie deren theoretische Grundlagen in Form von fachspezifischem und analytischem Wissen über den Prozess. Dabei sind die Ausführungszeiten für bestimmte (Rüst-)Tätigkeiten, insbesondere manuelle Tätigkeiten, elementar. Diese werden mit den Sollzeiten verglichen, um das Entwicklungs- und Leistungspotenzial zu beurteilen. Gleichzeitig können sie einen Auslöser darstellen, der den Wissensaustausch initiiert (**Phase 1**, Abb. 8.5). Ein wesentlicher Ausgangspunkt eines Wissenstransferansatzes ist die Erkenntnis, dass es zeitliche Unterschiede gibt. Die zeitliche Leistung der Maschineneinrichter kann demnach als Vergleichsbasis herangezogen werden. Wird dieser Vergleich mitsamt der Entwicklung der Rüstzeiten und Fehlerhäufigkeiten eines Bedieners ausgeweitet, können weitere wichtige Rückschlüsse auf die Initiierung eines Wissensaustauschs gezogen werden.

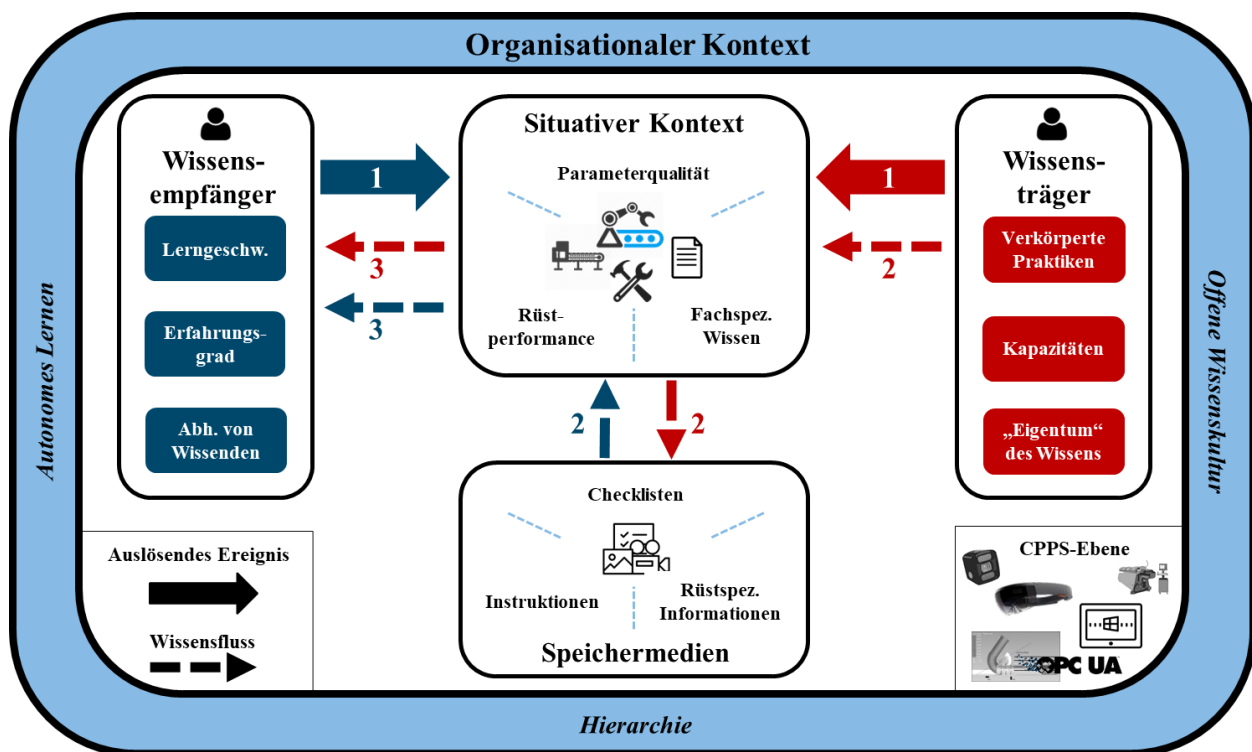


Abb. 8.5: Wissenstransfermodell im Rahmen industrieller Rüstvorgänge

Der organisatorische Rahmen des Modells wird maßgeblich von drei Aspekten gebildet: autonomes Lernen, eine offene Wissenskultur sowie eine gelebte Hierarchie. Erfahrene Mitarbeiter leiten unerfahrene oder anzulernende Kollegen zum autonomen Lernen an, nachdem sie ihnen gezeigt haben, wie spezifische Aufgabeninhalte und Verfahrensweisen auszuführen sind. So können die Lernenden Verantwortung für den Lernprozess übernehmen, um sich die Qualifikationen bzw. das Wissen selbst anzueignen. Durch Schulungen und Workshops wird Wissen zudem extern eingebracht. Die Analyse hat weiterhin gezeigt, dass Berufsanfänger einen großen Teil ihrer Freizeit dem Erlernen ihres Handwerkszeugs widmen. Gleichzeitig sind die Unternehmen bestrebt, eine offene Wissenskultur zu pflegen, damit die Wissensträger das erworbene Wissen innerhalb des Unternehmens weitergeben und dieses nicht für sich behalten. Dieser Sachverhalt wird durch Teamleiter und Vorgesetzte bekräftigt, wodurch sich ein stark hierarchisch geprägter Charakter abzeichnet. Obwohl bspw. neue Arbeitnehmer bei der Gestaltung ihrer Lernprozesse und der Aneignung von gemeinsamem Wissen eine gewisse Autonomie aufweisen, können hierarchische Eingriffe in Form von Vorgaben oder Anweisungen bestimmen, wie Wissen angewendet wird.

Eine weitere organisatorisch geprägte Strategie des Wissenstransfers ist die Förderung der Dokumentation und Lösungsdarstellung von Arbeitsabläufen. Eine entsprechende Dokumentation stellt eine Möglichkeit dar, erfahrungsbasiertes Wissen durch das Teilen von „Know how“ festzuhalten (vgl. ACKERMAN et al., 2013; RANDALL et al., 1996), um einerseits unerfahrene Einrichter

zu unterstützen und andererseits erfahrene Mitarbeiter zu entlasten. Allerdings ist der Dokumentationsprozess zeitintensiv. Außerdem können schriftliche Instruktionen einen kommunikativen und praktischen Ansatz nicht ersetzen, sondern höchstens unterstützen. CPPS helfen dabei, die Erfassung und Bereitstellung bestimmter Informationsarten zu automatisieren, z. B. durch den Einsatz von AR-Technologien. In der **zweiten Phase** (2, Abb. 8.5) des Wissenstransfers ist die Archivierung und Verfügbarmachung von Wissen elementar und erfolgt oftmals durch direkte Kommunikation. Im Schichtbetrieb ist eine direkte Kommunikation allerdings nicht immer oder nur bedingt möglich. Somit kann der Austausch alternativ über Speichermedien asynchron in Form von Schritt-für-Schritt-Instruktionen oder Checklisten erfolgen, die durch mediale bzw. bild- und videobasierte Inhalte ergänzt werden.

Das Wissen, das sich Menschen durch Erfahrungen aneignen, ist implizit mit ihnen selbst verbunden, sodass es in ihren Praktiken verkörpert wird. Diese Art von Wissen lässt sich nur schwer verbal oder mittels Propositionen festhalten bzw. weitergeben. Wissensträger, die Wissen weitergeben sollen, können dafür oftmals nicht genügend Kapazitäten aufbringen. Außerdem wirft bspw. die Aufzeichnung und Weitergabe von erfahrungsbasierten Inhalten Fragen des „geistigen Eigentums“, des Datenschutzes sowie weitere ethische Aspekte auf, die berücksichtigt werden müssen. Daher besteht eine Notwendigkeit darin, die beschriebene Autonomie der Wissenssuchenden zu stärken.

Der Wissenserwerb und die Wissensintegration bilden die **dritte Phase** (3, Abb. 8.5) des Wissenstransfers. Wissenssuchende müssen in der Lage sein, neue Inhalte zu lernen, diese mit bekanntem Wissen zu kombinieren und in der Praxis auf Grundlage von gewonnenem Verständnis einzusetzen.

Für Wissensempfänger oder -suchende sind insbesondere ihre Lerngeschwindigkeit, ihr Erfahrungsgrad sowie ihre Abhängigkeit vom Wissensträger elementare Aspekte innerhalb des Wissenstransfermodells. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass manche Maschineneinrichter im Vergleich zu anderen z. T. deutlich kürzere Rüstzeiten bei gleicher oder nur geringfügig abweichender Qualität aufweisen. Unabhängig von möglichen Qualifizierungs- bzw. Fortbildungsmaßnahmen ist es nicht vollumfänglich möglich, für sämtliche Mitarbeiter dieselbe Lerngeschwindigkeit zu garantieren. Zu Beginn der Lernphase eines Wissenssuchenden kann dieser je nach Lerngeschwindigkeit sehr stark an die wissenden Personen gebunden sein. Diese Abhängigkeit kann zu Produktionsengpässen führen, wenn die Arbeitsschichten nicht mit den „richtigen“ Personen besetzt sind. Bei der Interaktion mit einem Wissensträger ist der Grad der Expertise des Wissenssuchenden für den Erfolg des Wissenstransfers entscheidend. Bestimmte prozessrelevante Details werden oftmals gar nicht erwähnt, weil sie für selbstverständlich gehalten werden.

8.2 Design eines AR-basierten Cyber-Physische Produktionssysteme für industrielle Rüstprozesse

Zusätzlich zu den auf Grundlage der empirischen Daten gewonnenen und durch das Wissenstransfermodell kanalisierten wissensbasierten Erkenntnissen wird nachfolgend aufgezeigt, wie qualitative Daten unter Einbindung der Nutzer und Entwickler zu Designimplikationen für ein CPPS im Rüstkontext überleiten können. Dabei wurden eine Reihe von Anforderungen an ein Unterstützungssystem identifiziert, das Maschineneinrichter bei industriellen Rüstvorgängen unterstützen soll. Diese Anforderungen wurden durch praxisorientierte Designimplikationen für CPPS im beschriebenen Kontext unter Berücksichtigung wesentlicher ergonomischer, kompatibilitätsbezogener und nutzerzentrierter Richtlinien technisch umgesetzt.

8.2.1 *Ableitung von Designimplikationen*

Die nachfolgend beschriebenen Ausführungen zeigen, wie auf Grundlage der Ergebnisse der kontextuellen Studie und unter Einbeziehung der relevanten Akteure, d. h. den Nutzern und Entwicklern, sowie weiteren methodischen Hilfsmitteln Implikationen für die Gestaltung eines AR-basierten Unterstützungssystems generiert werden konnten.

Aufgabenmodell für industrielle Rüstprozesse

Um ein praxisorientiertes Modell für den Rüstprozess von Industrie- bzw. Biegemaschinen zu erstellen, wurde der beschriebene Ansatz des „ConcurTaskTree“ herangezogen (vgl. PATERNÒ, 2005). Die Freigabe zur Herstellung einer Bauteilserie bildet den Abschluss und damit das übergeordnete Ziel eines Rüstprozesses. Auf Grundlage des artikelspezifischen Arbeitsauftrags erfolgt der Rüstprozess. Im Anschluss an den Rüstvorgang wird ein Bauteil hergestellt, das schließlich auf die geforderten Qualitätsmerkmale überprüft wird. Die Freigabe der Serienproduktion erfolgt im Falle eines toleranzgerechten Bauteilzustands. Abbildung 8.6 stellt ein Aufgabenmodell dar, das diese Kernaspekte zur Freigabe einer Produktionsserie umfasst: den Arbeitsauftrag, den Rüstvorgang sowie den Herstellungs- und Prüfprozess. Das einer Aufgabennotation zu entnehmende „+“-Zeichen zeigt an, dass sich die betreffende Aufgabe aus Teilaufgaben zusammensetzt. Nachfolgend werden lediglich die für die konzeptionellen Implikationen wesentlichen Notationen des CTT vorgestellt. Einzelne exemplarische Modellstrukturen können Anhang E (Abb. E1-E23) entnommen werden.

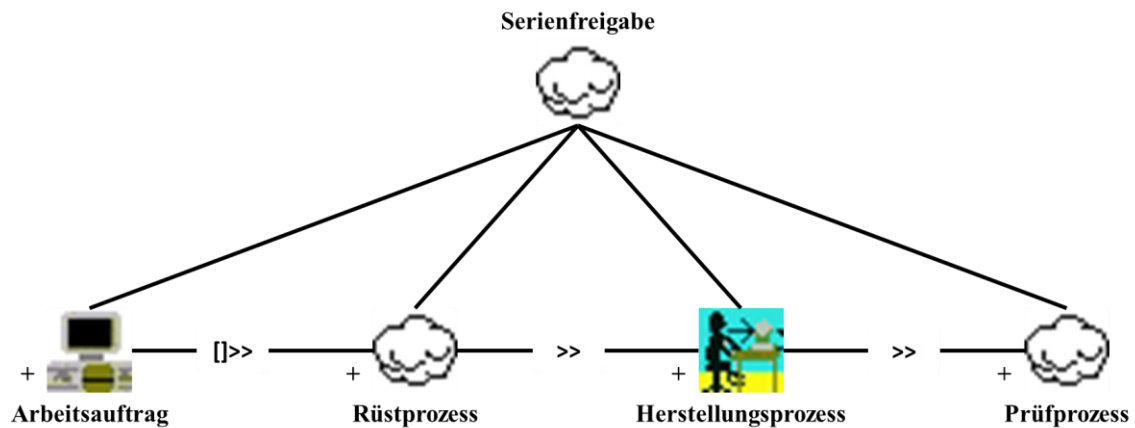


Abb. 8.6: Aufgabenmodell zur Serienfreigabe von industriellen Produkten mithilfe der modifizierten CTT-Notation (vgl. PATERNO, 2005)

Die informationelle Grundlage des gesamten Rüstvorgangs ist der artikelspezifische Arbeitsauftrag, der sowohl in digitaler als auch in Papierform vorliegen kann. Da dieser vornehmlich von einem Computersystem ausgegeben wird, wird er in dem Modell als Systemaufgabe („Application Task“) dargestellt. Diese Aufgabe ermöglicht die nächste, d. h. das eigentliche Rüsten der Maschine, indem sie die dafür relevanten Informationen weitergibt – dargestellt durch die „Enabling with Info Exchange“-Beziehung („[] >>“). Der Arbeitsauftrag setzt sich aus der Artikelnummer, dem Arbeitsplan, der Stückliste und den Geometriedaten sowie der Menge des zu produzierenden Enderzeugnisses zusammen. Im Zuge eines Artikelwechsels gibt die Information an, welche Werkzegelemente auf Basis des vorherigen und des nachfolgenden Artikels gerüstet werden sollen. Sobald diese Information dem Maschineneinrichter vorliegt, kann der Rüstvorgang beginnen. In Abbildung 8.7 wird am Beispiel der statischen sowie mechanischen und nicht-mechanischen Arbeitsanteile eine weitere Detailebene des Aufgabenmodells für das maschinelle Rüsten dargestellt.

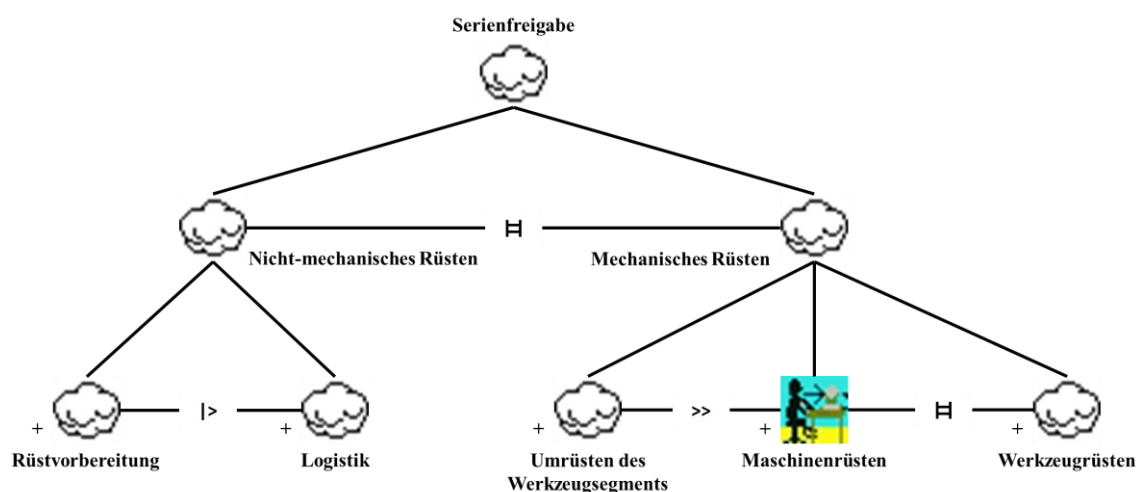


Abb. 8.7: Detailansicht des Aufgabenmodells für den statischen Rüstvorgang mithilfe der modifizierten CTT-Notation (vgl. PATERNO, 2005)

Standardverfahren und -schritte, die leicht reproduziert werden können (z. B. Maschinenrüsten, logistische Bereitstellung der Werkzeuge etc.), stehen stark variablen Arbeitsabläufen (z. B. Änderung der Faltenglätterposition, Änderung im Maschinenprogramm etc.) gegenüber. Die folgenden im Zuge der Interviews getätigten Aussagen von Maschineneinrichtern bekräftigen diese Erkenntnis.

„Das Rüsten der Werkzeuge erfolgt mehr oder weniger immer nach dem gleichen Verfahren [...]. Im Prinzip ist der Inhalt der Montage und Demontage des Werkzeugs derselbe“ (TN1).

„Nach dem Rüsten zählt das erste produzierte Teil. Wenn ich das sehe, weiß ich, ob ich weitere Anpassungen vornehmen muss oder die Serie freigeben kann. [...] Entweder es passt beim ersten Mal oder man muss es mehrmals korrigieren“ (TN24).

Die Teilnehmer wiesen immer wieder auf den wissensintensiven und stark auf Erfahrung basierenden Charakter des Einrichtungsprozesses hin (*„Das Einrichten der Maschine ist sehr komplex. Da muss man sich überlegen, was man ändert und was [mit dem Bauteil, Anm.] passieren wird. Jeder Einrichter arbeitet anders“*, TN6). Unerfahrene Maschineneinrichter müssen oftmals die Hilfe der erfahrenen Arbeitspersonen suchen, da insbesondere die Rüst-Instruktionen entweder veraltet oder in Bezug auf unterschiedliche Produkte, Werkzeuge und Materialien zu unspezifisch sind. Erfahrene Bediener betonen wiederum, dass es wichtig sei, neue bzw. weniger erfahrene Mitarbeiter in Bezug auf den jeweiligen Rüstprozess vollumfänglich und fehlerfrei zu schulen. Somit kann einem Mehraufwand, der durch Aufgaben, die in Verbindung mit dem Transfer von Wissen und Know-how steht, entgegengewirkt werden. TN11 merkte in diesem Zusammenhang an:

„Wir müssen den neuen Leuten die schriftlichen Anweisungen mehrmals erklären. Das ist kompliziert [...]. Mit der Zeit ist das auch anstrengend. Ich muss jeden einzelnen Schritt erklären“.

Diese Erkenntnisse machen deutlich, dass die Maschineneinrichter ein System benötigen, das sie bei der effektiven Weitergabe von Wissen und Know-how unterstützt. Neben der hohen Prozesskomplexität, die u. a. durch das in verkörperten Handlungen eingebettete Wissen begründet ist, muss ein entsprechendes Unterstützungssystem außerdem garantieren, dass durch dessen Einsatz weder die Produktivität noch die Durchführungsdauer des Rüstvorgangs beeinträchtigt werden. Die Arbeitspersonen müssen von dem System prozessbegleitend geführt werden, um ihnen Möglichkeiten zur Prozessoptimierung visualisieren zu können.

Individuelle Rüstszenarien

Die einzelnen Aufgabenmodelle waren für eine konstruktive Kommunikation innerhalb des Entwickler-Konsortiums sehr gut geeignet. Allerdings wurden sie von den Teilnehmern der empirischen (Feld-)Studie trotz großen Umfangs als unspezifisch empfunden. Durch eine erforderliche abstrakte bzw. z. T. vereinfachte Darstellung der Inhalte, werden relevante und sehr detaillierte Informationen, die für ein vollumfängliches Verständnis wichtig sind, nicht implementiert. Für die partizipatorische Designaktivitäten wurde daher zusätzlich ein szenario-basierter Ansatz gewählt. Dieser Ansatz trägt dazu bei, Designentscheidungen schnellstmöglich und unter Vermeidung von etwaigen Engpässen wissenschaftlicher Natur unter Einbeziehung der Teilnehmer zu diskutieren (CARROL, 2000).

Auf der Grundlage der ermittelten Anforderungen wurden zwei Szenarien ausgearbeitet, die mithilfe von Storyboards textlich und visuell illustriert wurden (siehe Abb. 8.8). Diese Artefakte wurden verwendet, um innerhalb der Design-Workshops Diskussionen anzuregen und bisherige sowie weitere Entwicklungsschritte mit den Teilnehmern abzustimmen.

Neben den Bedürfnissen und Erwartungen der potenziellen Nutzer wurden auch mögliche Technologien erörtert, die zur Erfüllung dieser Anforderungen eingesetzt werden könnten. Die Diskussionen bekräftigten die Erkenntnis, dass Maschineneinrichter sehr daran interessiert waren, anhand des bestmöglichen Ansatzes voneinander zu lernen und den Prozess kontinuierlich zu optimieren, wie u. a. das folgende Zitat von TN20 verdeutlicht:

„Jeder hat seine eigenen Methoden. Er hat sich jetzt für diese Methode entschieden und es hat schnell funktioniert. [...] Das bedeutet, so wenige Schritte wie möglich zu machen. Aber wir müssen darüber diskutieren, um die goldene Mitte abzuleiten. [...] Das ist etwas, was wir gemeinsam tun müssen“.

In Bezug auf die Konzipierung des Systems impliziert dieser Sachverhalt, dass Informationen über einzelne Schritte bestimmter Rüstkonfigurationen aufgezeichnet und bearbeitet werden müssen. Somit kann das System potenziell Änderungen der Arbeitspraktiken umsetzen und möglicherweise zu einer Standardisierung der Rüstvorgänge führen. Dies würde den Forderungen der Lean-Management-Methode entsprechen, die sich, u. a. mithilfe des SMED-Ansatzes, auf die Optimierung industrieller Prozesse und die Verringerung von Kapazitäten konzentrieren (vgl. HASLE et al., 2012).

Die Aufteilung des Unterstützungssystems in zwei Module – entsprechend der Aufteilung des Rüstprozesses in statische und dynamische Anteile – wurde sowohl im Rahmen der empirischen

Datenerhebung als auch im Zuge der Workshops als sinnvoll erachtet. Ein assistenzähnliches System soll somit zur Erstellung (Modul „Schreiben“) und zur Visualisierung (Modul „Lesen“) sowie zur Neuordnung der Rüstschritte (Modul „Konfiguration“) beitragen und einen checklisten-ähnlichen Charakter aufweisen. Bereits SHINGO (1985) erkannte das Potenzial von Checklisten zur Reduzierung von Durchführungszeiten bei industriellen Rüstvorgängen, das u. a. von TN21 bestätigt wurde:

„So eine überschaubare Rüstreihenfolge, damit man genau weiß, was man als erstes macht, was als zweites und so weiter. Dann braucht man explizite Hinweise auf die Werkzeuge und Hilfsmittel. Da hilft es nicht, wenn mir gezeigt wird: nehmen Sie einen Maulschlüssel. Das ist ja schön und gut, aber ist das jetzt ein 17er- oder ein 19er-Schlüssel? Wenn ich das nicht weiß, verschwende ich Zeit“.

Darüber hinaus haben die Teilnehmer den Bedarf an zeitnahe Feedback zu den Maßnahmen der Maschineneinrichter bekräftigt, um sie bei der Identifizierung möglicher Ursachen für ein bestimmtes Problem schnellstmöglich zu unterstützen. Außerdem sollte das System mobil genutzt werden können, da verschiedene Werkzeuge und Maschinen im Werk verteilt sein können und einen entsprechenden Bewegungsradius der Einrichter erforderlich machen:

„Man kann eine Menge Dinge im Computer speichern. Aber der Nachteil ist, dass ich ihn nicht mitnehmen kann. Die beste Lösung wäre eine Brille, weil ich dieses Gerät mitnehmen kann, wenn ich unterwegs bin“ (TN7).

In Bezug auf die Verteilung der für die Rüstvorgänge benötigten Ressourcen in der Produktionsstätte erwähnten die Arbeitnehmer, dass das System Werkzeuge lokalisieren und eine Auskunft über deren Zustand geben kann. Ein defektes Werkzeug muss bspw. für die involvierten Instanzen, d. h. die zuständige Abteilung (hier: Werkzeugbau) und den verantwortlichen Maschineneinrichter gemeldet werden, um Wartezeiten zu vermeiden.

Saskia Wasser ist eine 35-jährige Maschinenbedienerin. Sie gehört dem Unternehmen seit nunmehr zwei Jahren an. Zuvor hat Frau Wasser als ausgebildete Fachverkäuferin in einer Bäckerei gearbeitet. Durch den Branchenwechsel kann sie entsprechend keine industrielle Berufserfahrung bzw. Rüstverfahren vorweisen. In ihrer Freizeit beschäftigt sich Frau Wasser gerne mit neuen Technologien, v. a. im Hinblick auf die Nutzung von Smartphones oder Tablets. Frau Wasser stellt sich ihre Tätigkeit als Maschinenbedienerin zukünftig folgendermaßen vor: „Ich habe nur wenig Erfahrung sammeln können und möchte daher gerne mehr Wissen rund um den Rüstprozess aufbauen.“

Heute sucht der Meister bzw. Gruppenleiter und Vorgesetzte von Frau Wasser, Herr Tobias Schwandt, sie persönlich auf und übermittelt ihr den nächsten Produktionsauftrag. Der nächste Artikel wird auf der Maschine „CN 150“ gefertigt. Herr Schwandt erkundigt sich bei Frau Wasser, wann der aktuelle Artikel vollständig produziert sein wird. Sie antwortet: „Es müssen noch 20 Stück des Artikels gefertigt werden. Das dauert ca. 30 Minuten.“

Nachdem die Stückzahl des aktuellen Auftrages erreicht und der Fertigungszyklus beendet ist, geht Frau Wasser an die Terminalstation und entnimmt die HoloLens aus dem Schrank „Mobile Endgeräte“. Nachdem Sie die Datenbrille aufgesetzt und angeschaltet hat, verbindet diese sich automatisch über WLAN mit dem umliegenden Maschinen. Sie startet die „Expert to Go“-Software. Die Anmeldung erfolgt über eine Liste mit der Namensauswahl und der Eingabe eines Passwortes. Nun scannt sie den Auftrag ...

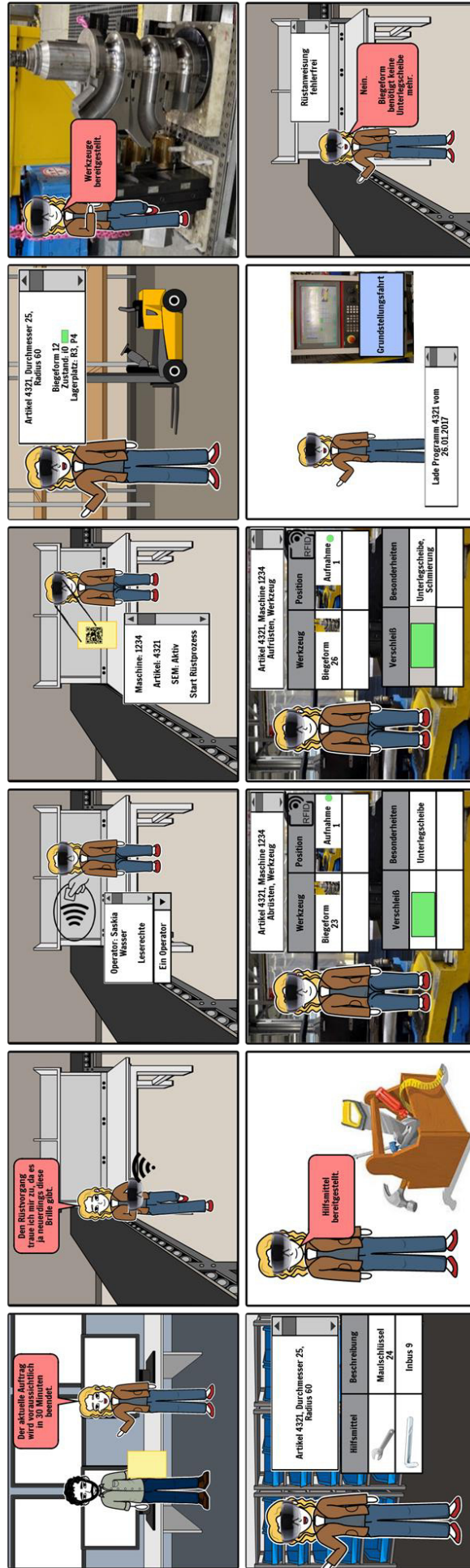


Abb. 8.8: Textauszug aus dem beispielhaften Skript (oben) und Visualisierung eines Storyboards (unten) zu dem vorliegenden RüstszENARIO bzw. dem Usecase „Lesen“

Übergang der empirischen Befunde zu den Designimplikationen

Die beschriebenen beispielhaften Ausführungen wurden mit den Erkenntnissen aus der gesamten empirischen Studie verknüpft, um auf dieser Grundlage Entscheidungen hinsichtlich der Technologieauswahl und des Systemdesigns treffen zu können. Im Folgenden werden die wichtigsten Elemente beschrieben, die ein CPPS aufweisen sollte, um Maschineneinrichter bei ihrer täglichen Arbeit adäquat unterstützen zu können.

Insgesamt wurden *sechs wesentliche Designimplikationen (DI)* herausgestellt. Die Ausführungen zeigen auf, dass die beschriebenen Themenbereiche die von LEE et al. (2015) entwickelte und technisch orientierte 5-Ebenen-Architektur erweitern und konkretisieren können. Die Erkenntnisse beinhalten sozio-technische Designaspekte und Möglichkeiten der Generierung einer wissensorientierten Arbeitsumgebung.

Durch inkorrekte Einstellungen der Einrichter an Maschinen und Werkzeugen können diese beschädigt werden. Die *Verwendung von Sensoren zur Erfassung von Realdaten (DI 1)* schafft diesbezüglich Abhilfe. Sie bezieht sich im Wesentlichen auf die „Smart Connected“-Ebene von LEE et al. (2015). Sensorbasierte Bewegungsverfolgung bzw. „Wegtracking“ kann im Zuge des Rüstvorgangs entstandene Laufwege insbesondere für logistische Aktivitäten aufzeichnen und z. B. in Form eines Spaghetti-Diagramms ausgeben (vgl. SENDERSKÁ et al., 2017). Weiterhin verhilft eine sensorbasierte Erkennung, bspw. durch eine 3D-Kamera, zur eindeutigen Identifikation der Werkzeuge und zur Bestimmung der Montageposition auf der Maschinenachse. Somit wird eine Plausibilitätsprüfung der Rüsteinstellmaßnahmen mithilfe externer Sensoren zur Vermeidung von Werkzeugkollisionen und zur unmittelbaren Rückmeldung an den Bediener geschaffen. Mithilfe von Sensorik kann außerdem lokales Handlungswissen in Form von Videos aufgezeichnet und weitergegeben werden. Sensorik kann dem Maschineneinrichter also produktspezifische Eigenschaften in Echtzeit visualisieren und damit eine kontextsensitive Interaktion ermöglichen.

Die Vielzahl möglicher Einstellungsmöglichkeiten der Maschine bzw. der einzelnen Werkzeuge erschweren eine fehlerfreie Konfiguration der Maschine. Diese Komplexität kann nicht durch die reine Abbildung realer Daten eingedämmt werden. Daher werden in *Situationen, in denen keine realen Daten zur Verfügung stehen, digitale Simulationen genutzt (DI 2)*. Dies kann der Ebene zur Umwandlung von Daten in Informationen zugeordnet werden. Durch die Einblendung von 3D-Hologrammen der Maschine bzw. Werkzeuge werden reale (zu rüstende) Elemente durch virtuelle (CAD-)Daten überlagert (AR-Overlay), um dem Nutzer eine eindeutige Funktionsdurchführung zu ermöglichen. Darüber hinaus kann durch virtuelle kinematische Simulationen in der Planungsphase sowie mithilfe der AR-Visualisierungen an der realen Maschine

während des Rüstvorgangs eine kollisionsfreie Montage der Werkzeuge gewährleistet werden. Die virtuelle Generierung von Prozessdaten kann also die Übersetzung bestimmter Aspekte des lokalen Wissens in propositionale Inhalte ermöglichen.

Die „Cyber“-Ebene von LEE et al. (2015) beinhaltet die *Verknüpfung digitaler Daten zu Arbeitspraktiken bzw. erfahrungsbasiertem Wissen (DI 3)*. Dabei geht es im Wesentlichen darum, einen digitalen Zwilling respektive ein Zwillingsmodell als virtuelle Repräsentation der realen Arbeitsabläufe für den Umgang mit Werkzeug- und Maschinenkomponenten zu erzeugen. Virtuelle Daten werden in einer AR-Animation innerhalb des Unterstützungssystems erstellt und in einem Dashboard visualisiert. Dabei ist eine lernfreundliche Umgebung durch eine realitätsnahe und kontextsensitive Datenaggregation sowie einen hohen und problemorientierten Detailgrad mit einem möglichst geringen Komplexitätsgrad herzustellen. In diesem Zusammenhang ist die Vollständigkeit sämtlicher Rüstinformationen ein wesentliches Kriterium für die erfolgreiche Durchführung des Prozesses. Alle für die Tätigkeit erforderlichen Ressourcen müssen dem jeweiligen Rüstschritt eindeutig zugeordnet sein.

Das Rüsten von Industriemaschinen ist ein stark wissensintensiver Vorgang, der ein tiefgründiges Prozessverständnis erfordert. Dieses Wissen entwickelt sich im Laufe der Zeit durch Erfahrung. Es bestehen große Unterschiede hinsichtlich des vorhandenen Wissens der Maschineneinrichter. Die Speicherung von Wissen sowie die individuelle und unabhängige Zugänglichkeit von multimedialen Inhalten stellt innerhalb einer industriellen Umgebung einen entscheidenden Vorteil dar (vgl. CAUDELL & MIZELL, 1992). Fortschrittliche (technologische) Systeme weisen ein großes Potenzial zu einer lückenlosen, detailgetreuen und aktuellen Informationsdarstellung auf (vgl. PAELKE & RÖCKER, 2015). Die Visualisierung von Rüstschritten wird auf der zweiten Ebene der CPPS-Architektur initiiert und auf der vierten Ebene, der Kognitionsebene, mittels einer AR-Anwendung zu einer vollständigen Rüstinstruktion zusammengefasst. Auf Basis dieser interaktiven Anweisung stehen Rüstinformationen unabhängig von einer personellen Verfügbarkeit zur Verfügung. Somit wird auf Basis der erfassten und visualisierten Rüstinformationen ein *Wissens-transfer unterstützt (DI 4)*. Das Assistenzsystem muss also die Möglichkeit bieten, einerseits Wissen und Know-how erfahrener Arbeitnehmer zu sammeln und andererseits weniger erfahrenen Mitarbeitern den Zugang zu diesen Kenntnissen und Erfahrungen zu ermöglichen. Auf der Grundlage früherer Erfahrungen müssen die Arbeitspersonen in der Lage sein, den Rüstprozess erfolgreich und effizient durchzuführen.

Sofern keine Rückmeldungen über einen fehlerfreien bzw. fehlerbehafteten mechanischen Rüstvorgang gegeben werden, erzeugt dieser Umstand eine Unsicherheit seitens der Maschineneinrichter. Hinsichtlich der Erstellung von Rüstinstruktionen, die in Bezug auf den beschriebenen

Sachverhalt Abhilfe schaffen würden, sind jedoch weitere Barrieren zu überwinden. Zum einen besteht eine große Variabilität hinsichtlich der Vorgehensweise mechanischer Rüstvorgänge, die mit individuellen Erfahrungen und Vorlieben zusammenhängen. Außerdem sind entsprechende Dokumentationen nur unter hohem Zeitaufwand zu erstellen und weisen nach Prozessänderungen immer wieder Lücken auf. Checklisten, die eine schnelle und interaktive Generierung und Änderung der Anweisungen ermöglichen, verhelfen zugunsten einer Fehlervermeidung zur Verifizierung oder Falsifizierung der physischen Verfügbarkeit oder der Soll-Montageposition von Werkzeugen, zur Abbildung logistischer Abläufe im Zuge des Rüstvorgangs und zur schrittweisen Darstellung der Arbeitsaufgabe in Form von textlichen sowie bild- und videobasierten Inhalten (vgl. FILLATREAU et al., 2013). Die beschriebenen Erkenntnisse stimmen mit der Konfigurationsebene von LEE et al. (2015) überein. Diese **Unterstützung der Datenkonfiguration (DI 5)** kann als iterativer und lernförderlicher Ansatz verstanden werden, der durch rollierende Anpassungsmöglichkeiten der Arbeitsabläufe einen Best-Practice-Ansatz verfolgt und ein nutzerzentriertes Feedback auf Basis von AR-Technologie zur situativen Unterstützung des Bedieners gewährleistet.

Eine Implikation, die nicht explizit von LEE et al. (2015) benannt wird, dafür aber sämtliche Ebenen durchdringt, betrifft die Interaktionsherausforderungen, denen sich ein Einrichter bzw. eine Einrichterin im Produktionsalltag stellen muss. Unter Berücksichtigung dieser Herausforderungen, die sich hauptsächlich aus den Interaktionen zwischen Nutzern und dem System in der Umgebung ergeben, in der das System eingesetzt wird, soll eine **praktikable Interaktion im industriellen Kontext (DI 6)** gewährleistet sein. Das Einrichten von Industriemaschinen erfordert insbesondere eine erhöhte Mobilität und den ständigen Einsatz beider Hände, um die verschiedenen Rüstschritte durchführen zu können. Daher sollte ein mobiles System zur Visualisierung relevanter Informationen an den erforderlichen verschiedenen Orten zeitnah und fehlerlos zur Verfügung stehen. Somit kann einem Wissensdefizit und einer fehlerintoleranten Produktionsumgebung entgegengewirkt werden. Eine angemessene Visualisierung der Inhalte bedarf sowohl einer modularen oder schrittweisen Erfassung als auch Wiedergabe eines multimedialen Datenmaterials aus der Ich-Perspektive. Diese Anforderungen können bspw. mithilfe von gestengesteuerten Head-Mounted Displays realisiert werden. HMDs bzw. Datenbrillen gewährleisten, dass der Nutzer beide Hände einsetzen kann, um Rüstoperationen auszuführen. Weiterhin sind diese mobilen Systeme in begrenzten Arbeitsräumen von Vorteil. Einerseits muss das System robust genug sein, um etwaige Unfälle ohne funktionelle Ausfälle zu überstehen. Andererseits dürfen Umgebungsbedingungen nicht beeinträchtigen, wie industriebedingter Lärm, die Arbeitssicherheit sowie die Funktion respektive Interaktion mit dem Gerät. In diesem Zusammenhang verhilft geeignete Sensorik

zugunsten einer effizienten, fehler- und beanspruchungsminimalen Instruktion dazu, den Arbeitsbereich zu überwachen und etwaige Unsicherheiten seitens des Nutzers zu verringern. Eine schrittweise Erfassung der erforderlichen Arbeitsschritte kann zudem in Kombination mit einer Ortungsfunktion als Grundlage für Optimierungsmaßnahmen des gesamten Rüstprozesses dienen.

8.2.2 Technische Umsetzung der Designimplikationen

Das Potenzial neuer Technologien zur Verbesserung von Wissenstransferprozessen, wie z. B. durch AR, wurde bereits ausführlich diskutiert. Neben einer geeigneten Auswahl der Unterstützungssysteme und deren Einbindung in die technische Infrastruktur bedarf es einer reibungslosen Integration der Nutzerinteraktionen mit der Technologie während des gesamten Rüstvorgangs. Die beschriebenen Interaktionsanforderungen und Designimplikationen können wiederum in vier Dimensionen aufgeteilt werden (siehe Abb. 8.9): *die Erstellung und Visualisierung von Rüstinstruktionen (I)*, *der Einsatz von Sensoren (II)*, *das kollaborative Editieren von Rüstschritten (III)* und eine *dynamische Rüstunterstützung (IV)*.

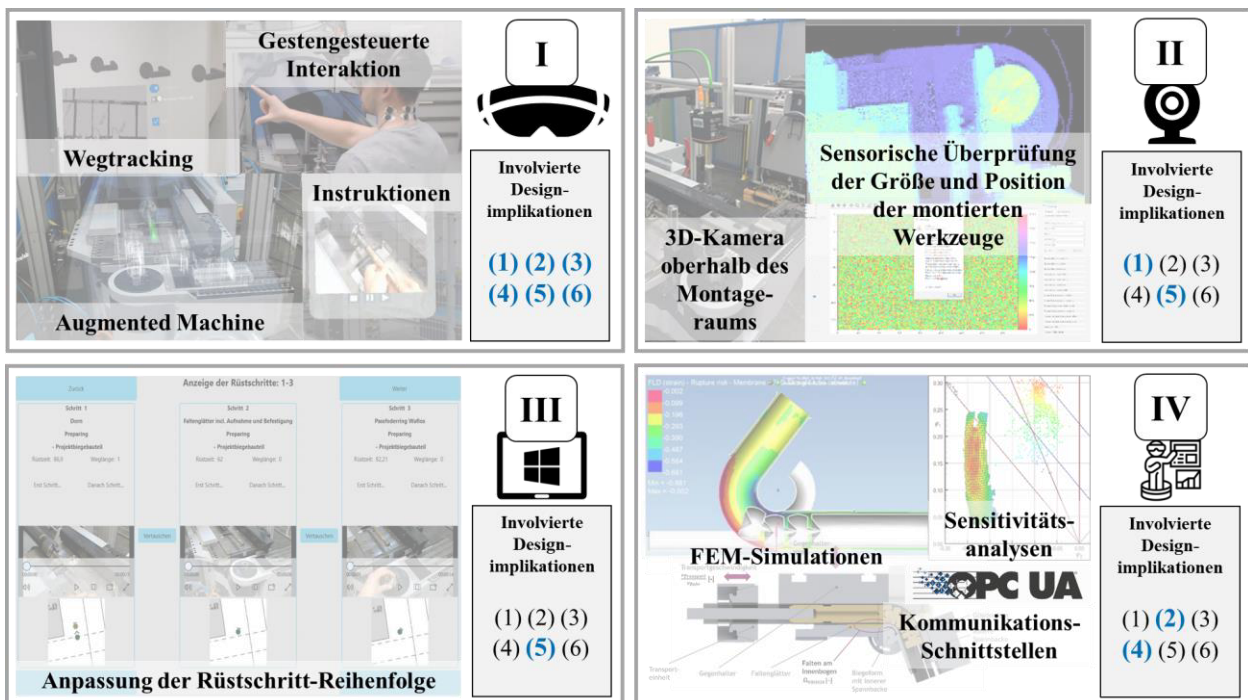


Abb. 8.9: Exemplarischer Überblick über die abgeleiteten Gestaltungsimplicationen in Bezug auf deren Umsetzung in CPPS

Die Konzipierung der Basisarchitektur des einzusetzenden CPPS richtet sich nach der inhärenten Aufteilung der Rüstinstruktionen in statische und dynamische Vorgänge. Dementsprechend setzt sich das für den vorliegenden Kontext einzusetzende CPPS aus Elementen für den statischen

bzw. reproduzierbaren Rüstvorgang („Static Expert Module“), d. h. einem Rüst-Editor, einem Visualisierungstool sowie internen und externen Sensoren, der Biegemaschine selbst und Komponenten zur Unterstützung der dynamischen Vorgänge zusammen. Das „Dynamic Expert Module“ umfasst einerseits virtuelle Produktionsparameter, wie z. B. FEM- oder Sensitivitätsanalysen, und andererseits ein „Case-Based Reasoning“ (CBR)-Modul (vgl. BORCHMANN, 2021; AAMODT & PLAZA, 2001). Das CBR-Modul sammelt fallbasiert historisch gewachsene, gespeicherte Erfahrungseinheiten. Ein Fall (Case) wird durch Artikeldaten, eine Problembeschreibung bzw. biegespezifische Parameter mit Bezug zum herzustellenden Artikel oder zur interessierenden Biegestelle, eine zugehörige Lösung respektive Maßnahme und eine entsprechende Bewertung beschrieben. Sollten keine Daten in der Fallbasis (Case Base) vorliegen, dienen die beschriebenen virtuellen Produktionsparameter als „erste“ Datenbasis.

Erstellung und Visualisierung von Rüstinstruktionen

Die Umsetzung einer prototypischen Rüst-Software für die AR-Datenbrille „Microsoft HoloLens“ der ersten Generation wurde sämtlichen Implikationen bestmöglich gerecht (siehe **I**, Abb. 8.9). Es konnte eine Assistenzsoftware entwickelt werden, die den Nutzern die Erstellung und Visualisierung von Rüstanweisungen anhand von bildbasierten und multimedialen respektive holografischen Inhalten in Form von Checklisten (**DI 4**) und AR-Animationen (**DI 2** und **DI 3**) ermöglicht. Der sogenannte „Expert to Go“ setzt sich aus drei Grundfunktionen zusammen: Schreiben bzw. Aufnehmen sowie Lesen bzw. Wiedergabe der rüstspezifischen Informationen und die Konfiguration der Rüstschritte. Das „Schreiben“ ermöglicht dem Experten die Aufzeichnung prozessrelevanter Inhalte. Mithilfe des „Lesen“-Modus werden die Rüstanweisungen kontextspezifisch und schrittweise visualisiert sowie mit internen und externen Sensordaten und Simulationen angereichert. Der „Konfiguration“-Modus ermöglicht eine Neuordnung der Einrichtungsschritte mit einem Tablet, das über eine Cloud mit der HoloLens verbunden ist. Visualisierungen können durch die HoloLens in den aktuellen Kontext eingebettet werden, indem sie mit der Umgebung verschmelzen und kontextabhängige Anweisungen und Informationen anzeigen, sodass diese schnell gefunden und umgesetzt werden können (**DI 5**). Durch die Mobilität der HoloLens kann der Nutzer die Brille dort nutzen, wo Informationen benötigt werden (**DI 6**). Mithilfe integrierter Sensoren des HMD können logistische Abläufe respektive zurückgelegte Wege aufgezeichnet und nachverfolgt werden (**DI 1**). Aufgrund der meist stark verschmutzten Hände der Bediener, die auf Tätigkeiten mit geölten Komponenten zurückzuführen sind, und der Notwendigkeit des kontinuierlichen Rüstens an der Maschine ist die HoloLens-Interaktion via Gestensteuerung oder alternativ über Sprachbefehle von wesentlicher Bedeutung (**DI 6**). Ein weiterer Vorteil des Einsatzes der

HoloLens ist der spielerische Umgang mit dem Gerät. Somit wird einem sogenannten „Gamification“-Effekt gefolgt, der positiv zum Wissenstransfer beiträgt (DI 4; vgl. VASILESCU et al., 2014).

Abbildung 8.10 stellt die wesentlichen Systemschnittstellen innerhalb des Schreiben-Modus des „Expert to Go“ dar. Die Visualisierung der Werkzeugelemente und Montagehilfsmittel, der Rüstinteraktion, eines animierten Hologramms und der sensorischen Daten ist Abbildung 8.11 zu entnehmen.

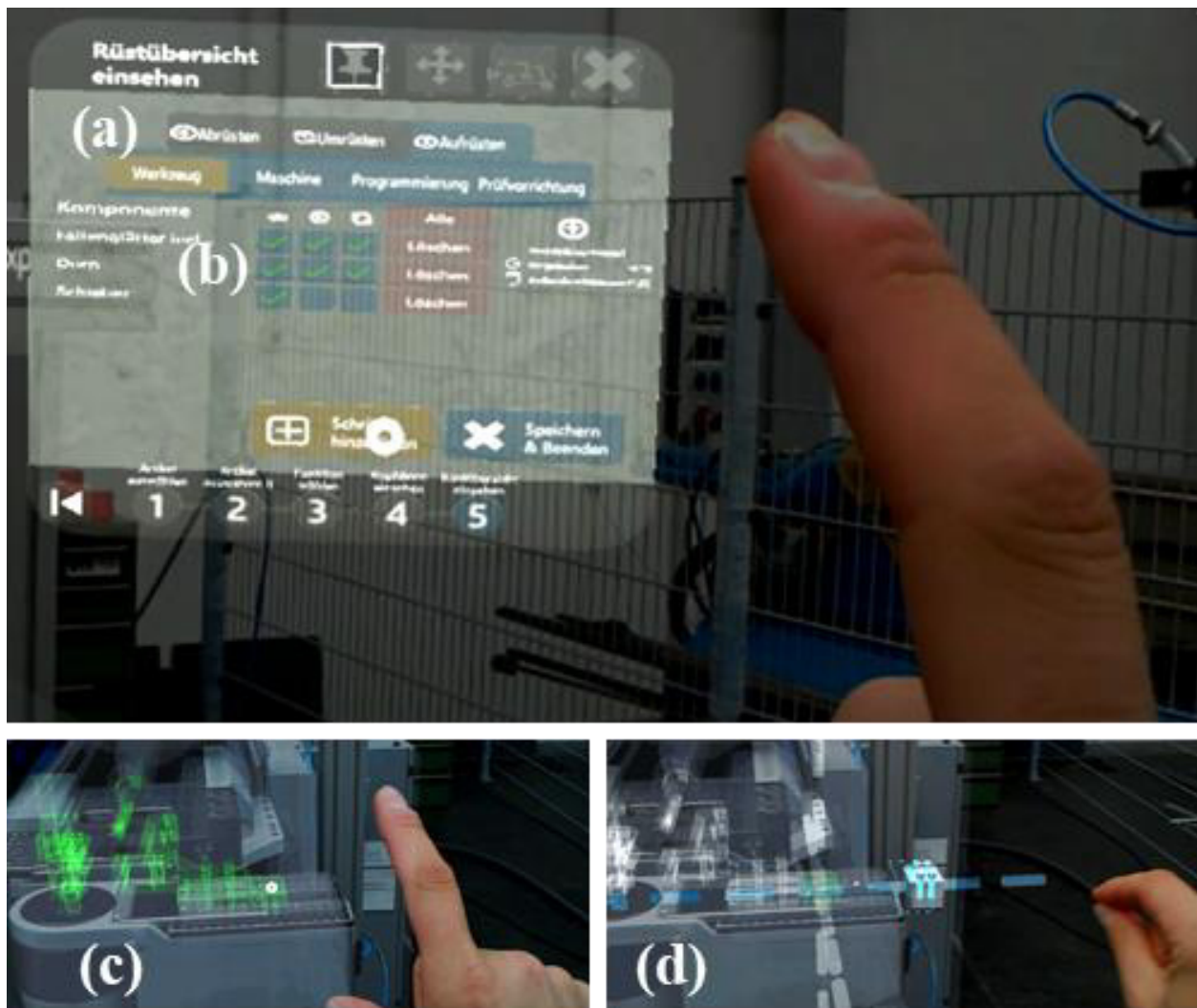


Abb. 8.10: Rüstübersicht innerhalb des Aufnahme-Modus des „Expert to Go“ mitsamt der Auswahl der Rüstkategorie (a) und einer Checkliste (b) zur Überprüfung der Vollständigkeit der Rüstanleitung, bestehend aus der Bestimmung des Werkzeugelements (c) und der Rüst-Interaktion (d)

Diese ermöglichen die Bearbeitung sämtlicher Rüstschritte der zu montierenden Werkzeugkomponenten. Mithilfe einer Rüstübersicht in Form einer Registerkartenauswahl (siehe Abb. 8.10, a, b) kann der Bediener zu dem gewünschten Rüstvorgangsschritt navigieren. Jeder Rüstschritt

kann mit drei Informationen verknüpft werden, deren erfolgreiche Speicherung durch eine Checkliste mit einem grün hinterlegten Haken bestätigt wird (siehe Abb. 8.10, b). Zunächst kann eine holografische Animation der Werkzeugpositionen und Montagerichtungen generiert werden, die auf der Auswahl des zu montierenden Bauteils (siehe Abb. 8.10, c) und der Festlegung der Montagerichtung mithilfe eines Koordinatensystems (siehe Abb. 8.10, d) basiert.

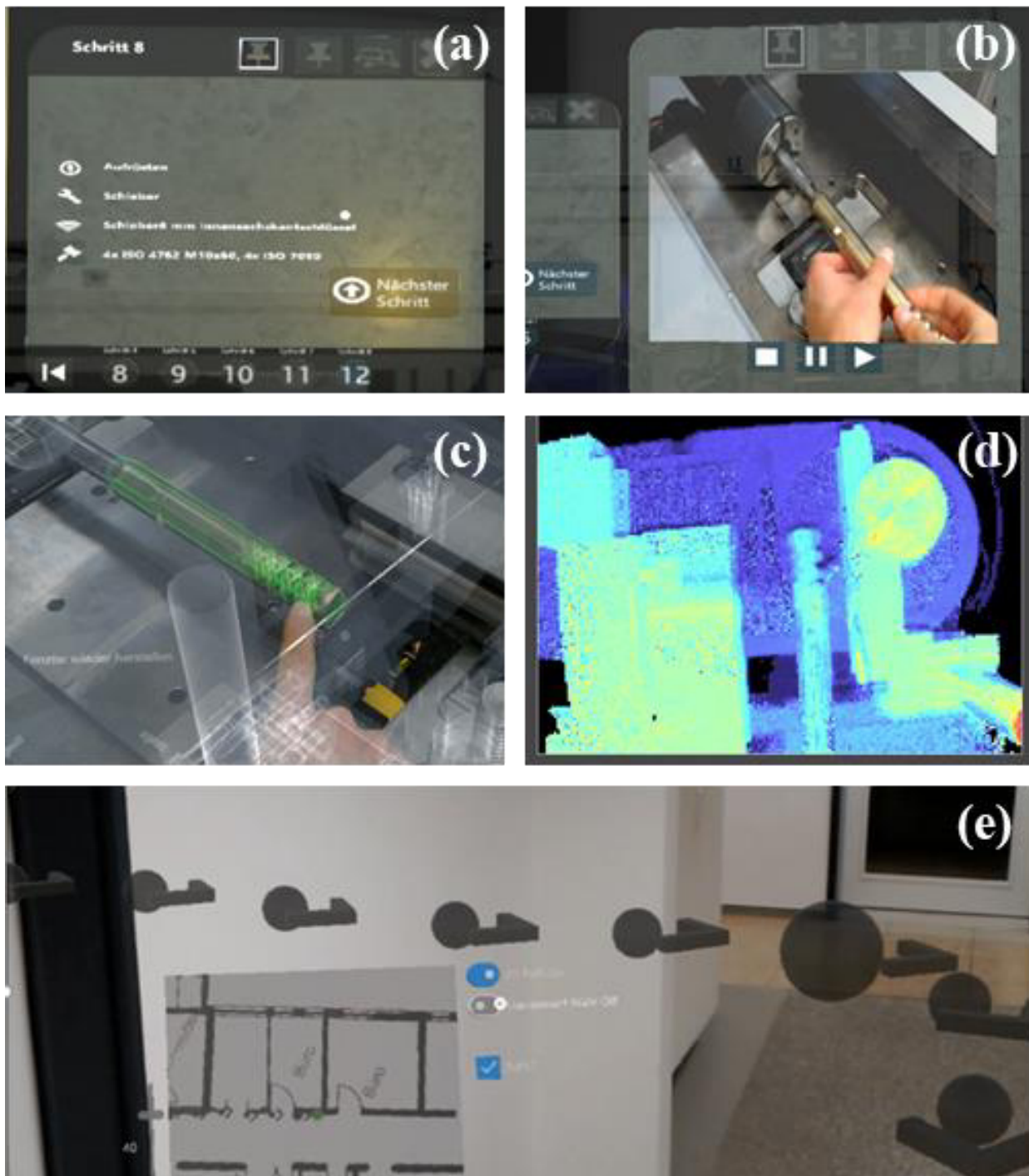


Abb. 8.11: Darstellung der Werkzeugelemente und Montagehilfsmittel (a), der Rüstinteraktion in Form eines Videos (b) und eines animierten Hologramms (c) sowie der sensorischen Daten, die ein 3D-Kamerabild (d) und aufgezeichnete Wege (e) umfassen

Die Grenzen der Technologie, d. h. der ersten Generation der HoloLens, führen dazu, dass die Animationen von der realen Darstellung marginal abweichen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, können zusätzlich sowohl ein Foto des Montageortes sowie ein Video zu dem jeweiligen Rüstschritt erstellt werden. Die im Rüst-Editor erstellten und gespeicherten Anweisungen können anschließend zusammen mit den zugehörigen Werkzeugstammdaten, welche die Bezeichnungen der Werkzeuge, die zugehörigen Montagehilfsmittel und Normteile (z. B. Schrauben) umfassen, visualisiert werden (siehe Abb. 8.11, a). Außerdem können die hinterlegten multimedialen Inhalte und die holografische Darstellung der Montageinteraktion (siehe Abb. 8.11, b, c) sowie der sensorischen Daten (siehe Abb. 8.11, d, e) eingesehen werden, sodass sämtliche relevanten Rüstinformationen zur Verfügung stehen.

Einsatz von Sensoren

Externe Sensoren, wie z. B. eine über dem Montageraum installierte 3D-Kamera, können zur Erfassung von Montagepositionen und Werkzeugabmessungen eingesetzt werden und den Nutzern über die HoloLens etwaige Probleme zurückmelden (siehe **II**, Abb. 8.9; **DI 1** und **DI 5**). Dazu ist eine Überwachungsspezifikation erforderlich, die anhand eines Schwellenwertes bzw. einer Position im Montageraum festlegt, wann eine Warnung ausgegeben werden soll. Eine inkorrekte Montage eines Werkzeugs wird durch ein rot markiertes Hologramm gekennzeichnet. Derartige Feedback-Mechanismen tragen zu einem effektiven Lernprozess des Einrichters bei.

Die Umgebungssensoren der HoloLens ermöglichen zudem, anhand der Erstellung von Spaghetti-Diagrammen einem SMED-Ansatz zu folgen. Die Wege der Arbeitspersonen können während des Rüstvorgangs aufgezeichnet und über eine Karte (siehe **III**, Abb. 8.9) sowie über sogenannte „Breadcrumb“-Hologramme (siehe **I**, Abb. 8.9) abgebildet werden. Ein „Breadcrumb“ oder „Breadcrumb trail“ stellt eine Art Navigationsverlauf dar, der dem Nutzer anzeigt, an welchem Punkt er sich innerhalb der Applikation bzw. des Anwendungsszenarios befindet. Die Breadcrumbs enthalten zusätzlich eine Heatmap-Funktionalität, bei welcher die Durchmesser der „Brotkrümel“ mit zunehmender Verweildauer des Einrichters an einer einzelnen Position zunehmen.

Kollaboratives Editieren von Rüstschritten

Mithilfe einer stationären PC-Anwendung, die als Tablet-Client eingesetzt werden kann, können sämtliche Rüstinformationen eingesehen und analysiert werden (siehe **III**, Abb. 8.9; **DI 5**). Neben der Betrachtung der Rüstschrittvideos kann auch auf „Wegtracking“-Daten zurückgegriffen

werden, um auf Grundlage dieser aggregierten Rüstdaten eine etwaige Änderung der Rüstschritt-Reihenfolge zugunsten einer lean-orientierten Prozessoptimierung anzustoßen.

Dynamische Rüstunterstützung

Die Datenbasis des dynamischen Rüstvorgangs setzt sich aus realen und virtuellen Rüstparametern zusammen. Mithilfe des Case-Based-Reasoning-Ansatzes können diese aggregiert werden, indem die Rüstparameter geometrischen, materiellen und maschinenbezogenen Eigenschaften der zu rüstenden Artikel zugeordnet werden. Somit bildet das System eine Fallbasis bzw. Historie einzelner Rüst Szenarien, die auf schnelle Parameteränderungen reagiert. Zusätzlich zu den beschriebenen artikelspezifischen Eigenschaften werden Qualitätsparameter herangezogen, die das gefertigte Produkt beschreiben, z. B. anhand des Biege- und Wanddickenfaktors oder des Biege-winkels. Ausgehend von geometrischen und materialbedingten Ähnlichkeitsmerkmalen zwischen einzelnen Artikeln lassen sich Rüstparameter zur Reduzierung des aufgetretenen Fehlerbildes ableiten. Je größer die vorhandene Fallbasis ist, desto präziser können die Rüstvorgaben generiert werden. Der Maschineneinrichter wählt zunächst anhand eines Ähnlichkeitsindikators und einer erfolgsversprechenden Bewertung einen Fall aus. Das System schlägt dann auf Basis der im Fall enthaltenen Informationen Änderungen der Rüstparameter vor. Der Bediener kann nun entscheiden, ob er sämtliche vorgeschlagenen Parameteränderungen ausführt oder experimentiert. In jedem Fall sollte der Nutzer das System nach einer Änderung der Anfangskonfiguration des Parameters über die durchgeführten Maßnahmen informieren und die Wirksamkeit der durchgeführten Änderungen mitteilen. Liegt ein hinsichtlich der ursprünglichen Parameterkonfiguration und der Änderungen nach dem Systemvorschlag unbekannter bzw. neuer Fall vor, wird dieser entsprechend in die Wissensbasis des Systems integriert (**DI 4**). Die Wissensbasis wird demnach mit jeder Änderung der Rüstparameter erweitert. Ist jedoch zum Zeitpunkt der Anfrage, z. B. bei der ersten Nutzung des Systems, keine Wissensbasis vorhanden oder liegen keine ähnlichen Fälle vor, können die Nutzer ihre Parameter über die Editorschnittstelle dem virtuellen Produktionssystem mitteilen. Damit wird eine FEM-Simulation angefordert, deren Ergebnisse manuell in die Wissensbasis integriert werden. Bei der Berechnung der virtuellen Parameter findet gleichzeitig eine Sensitivitätsanalyse statt, die nur die relevanten und effektiven Einstellparameter ermittelt und in Fälle umsetzt (siehe **IV**, Abb. 8.9; **DI 2** und **DI 4**). Entsprechende Simulationen liefern wichtige Informationen über das Materialverhalten und binden theoretische und physikalische Rahmenbedingungen des Rüstprozesses in die Entscheidungsfindung ein. Weitere inhaltliche Details können hinsichtlich der Erhöhung der Bauteilqualität im Zuge des Rotationszugbiegens der Ausarbeitung von BORCHMANN (2021) entnommen werden.

8.2.3 Technische Schnittstellen, Interface-Gestaltung und Workflow

Sämtliche im vorherigen Kapitel beschriebenen Elemente werden über verschiedene digitale Schnittstellen zu einer cyber-physischen Infrastruktur zusammengeführt. Die HoloLens ist über eine Cloud-Technologie mit dem Rüst-Editor bzw. dem Tablet-Client verbunden. Eine Kopplung der 3D-Kamera mit der HoloLens erfolgt wiederum über einen „WebSocket“. Die holografische Darstellung der Biegemaschine wird über CAD-Modelle auf die HoloLens übertragen. Außerdem wird eine Kommunikation zwischen der Biegemaschine und dem CBR-Modul über eine OPC-UA-Schnittstelle geschaffen, die über ein Maschine-zu-Maschine-Kommunikationsprotokoll zwecks industrieller Automatisierung erfolgt (vgl. LANGE et al., 2010).

In Bezug auf das vorliegende Praxisbeispiel nimmt insbesondere die Gestaltung der holografischen Interfaces, die durch sensorische Eingangswerte und deren Visualisierung angereichert bzw. unterstützt wird, als elementare Darstellungsform der HoloLens einen wichtigen Stellenwert ein. Die nachfolgende Abbildung 8.12 visualisiert entsprechende Basis-Hologramme. Im Folgenden wird Bezug auf den „Lesen“-Modus genommen, da dieser auch Bestandteil der ergonomischen Untersuchungen war. Der Workflow des „Static Expert Module“ beginnt mit der Anmeldung des Nutzers und der Auswahl der ab- und aufzurüstenden Artikel. Im Nachgang wird der Anwender mithilfe der Hologramme Schritt für Schritt durch die Rüstinstruktion geleitet. Dabei kann er den aktuellen Prozessstatus über eine entsprechende Anzeige (siehe Abb. 8.12, 1) sowie über eine sogenannte „Progress bar“ (siehe Abb. 8.12, 6) einsehen. Während ein Interaktions-Button zum nächsten Rüstschritt überleitet (siehe Abb. 8.12, 5), verhilft die Progress bar dazu, vorherige Rüstschritte oder Interfaces einzusehen. Die Hologramme beinhalten außerdem sogenannte „Window Commands“ (siehe Abb. 8.12, 2), um die Interfaces hinsichtlich Größe und Position manipulieren zu können. Über das „Parent“-Hologramm erhält der Nutzer textliche Informationen (siehe Abb. 8.12, 3) zum Arbeitsprozess, d. h. zum Rüstvorgang, Werkzeug, Montagehilfsmittel und zu Befestigungselementen. Er hat darüber hinaus die Möglichkeit, „Child“-Hologramme einzusehen. Maximal drei Fenster können zusätzlich zum Parent-Hologramm geöffnet werden. Diese enthalten bild- und videobasierte Inhalte mit zugehörigen Steuerelementen (siehe Abb. 8.12, 7). Darüber hinaus kann noch ein weiteres Interface zur Visualisierung von z. B. Simulationen, Zeichnungen, Explosions- oder 3D-Ansichten des zu fertigenden Artikels eingesehen werden. Über ein sich vor den Füßen des Nutzers befindliches „Home“-Menü kann der Nutzer geschlossene Fenster wiederherstellen (siehe Abb. 8.12, 8), Maschinendaten (siehe Abb. 8.12, 9) sowie die Rüstzeit einsehen (siehe Abb. 8.12, 10) und Darstellungsformen konfigurieren (siehe Abb. 8.12, 11).

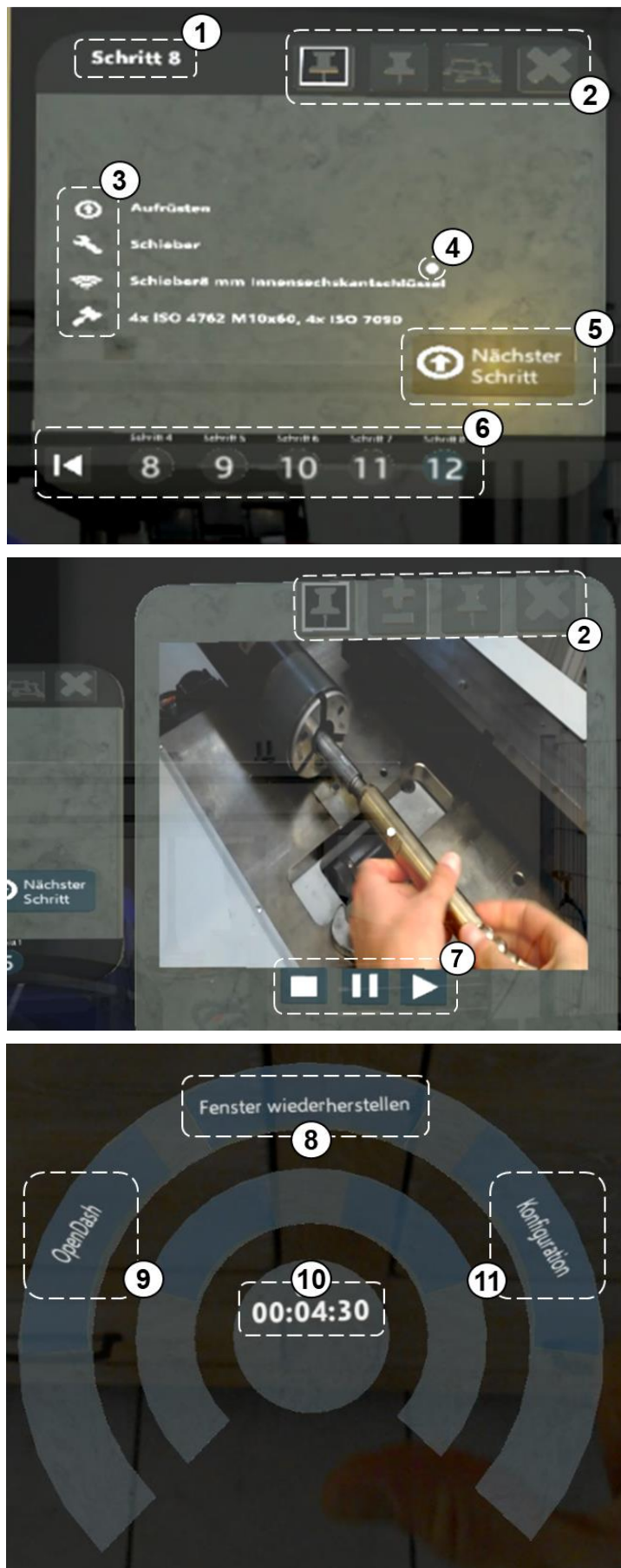


Abb. 8.12: Basis-Hologramme des „Expert to Go“: „Parent“- (oben) und „Child“-Hologramm (mittig) sowie das „Home“-Menü (unten)

Das CPPS wird zusätzlich durch virtuelle und interaktive 3D-CAD-Hologramme der Werkzeuge bzw. der Maschine ergänzt, die sich mit den realen Elementen überlagern. Der „Gaze Point“ (siehe Abb. 8.12, 4) zeigt die Blickrichtung des Anwenders an und dient als Interaktionscursor. Durch die im Rahmen des Rüstvorgangs bestehende Anforderung des freihändigen Arbeitens und aufgrund der in Industrieumgebung u. U. aufkommenden hohen Lärmexpositionswerte wurde innerhalb des Forschungsprojektes nur eine gesten-gesteuerte Interaktion betrachtet. Nach Beendigung des mechanischen Rüstprozesses kontrolliert eine 3D-Kamera die korrekten Montagepositionen der Werkzeuge, sodass der Nutzer auf Grundlage eines visuellen Soll-Ist-Vergleichs etwaige Änderungen vornehmen kann.

8.2.4 Ergonomische Gestaltungsparameter und Kompatibilität

Anhand ausgewählter, exemplarischer und nachfolgend aufgeführter Beispiele soll verdeutlicht werden, dass die wesentlichen Grundsätze zur interaktions-ergonomischen Gestaltung von informatorischen Arbeitsmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Kompatibilität eines Mensch-Maschine-Systems bestmöglich verfolgt wurden.

Für eine benutzerfreundliche, gebrauchstaugliche und letztlich ergonomische Gestaltung einer Mensch-System-Interaktion sollten insbesondere die beschriebenen internationalen Richtlinien der Normenreihe der DIN EN ISO 9241 zur Mensch-Computer- bzw. Mensch-System-Interaktion sowie das gesetzliche Regelwerk um die Verordnung über Arbeitsstätten (ArbStättV) und die Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (BildscharbV) mitsamt den DGUV-Informationen zu Bildschirmarbeitsplätzen (DGUV Information 215-410, 2019) und zur Software-Ergonomie (DGUV Information 215-450, 2021) beachtet werden. Im Folgenden werden am Beispiel der Rüstapplikation insbesondere die übergeordneten Empfehlungen zur Dialoggestaltung respektive zu Interaktionsprinzipien (DIN EN ISO 9241-110, 2020) und die allgemeinen Grundsätze zur Informationsdarstellung (DIN EN ISO 9241-112, 2017) unter Berücksichtigung einer menschenzentrierten Gestaltung (DIN EN ISO 9241-210, 2020) in Gänze betrachtet. Aus kapazitiven Gründen wird aber nur vereinzelt auf spezielle thematische Schwerpunkte inklusive etwaiger normativer Bezüge verwiesen.

Hardware-ergonomische informatorische Gestaltung

Die **Sichtbarkeit** gilt als wichtigstes Gestaltungsziel für eine hardware-ergonomische informatorische Gestaltung. Dementsprechend waren die Hologramme der HoloLens so anzuordnen, dass sie die prozessrelevanten Informationen gut lesbar und eindeutig darstellen. Zunächst können

durch das in dem HMD eingebaute „Liquid Crystal Display“ (LCD, vgl. DIN EN ISO 9241-303, 2011) Informationen reflexionsarm, flimmer- und weitgehend strahlungsfrei eingesehen werden. Ein helles und kontrastreiches Bild, das eine gute Lesbarkeit sicherstellt, sowie ein frühzeitiges Ermüden der Augen vermeidet, kann allerdings durch starken Lichteinfall (über 2000 Lux) beeinträchtigt werden. Das Gütesiegel „TCO Certified Displays“, das die Bildschirmqualität unter Berücksichtigung ergonomischer Richtlinien bewertet, fordert für Anzeigeleuchtdichten mindestens 150 cd/m^2 . Ein entsprechendes Qualitätssiegel trägt die HoloLens der ersten Generation zwar nicht, übersteigt mit 320 cd/m^2 jedoch den Referenzwert deutlich.

Die zentrierte Darstellung bzw. Anordnung der Hologramme vereint die wesentlichen Informationen in unmittelbarer Nähe zueinander. Das AR-Prinzip der HoloLens erlaubt eine individualisierbare Platzierung der Fenster (vgl. DIN EN ISO 9241-125, 2017). Die Hologramme können entweder an ebene Flächen im Umfeld des Nutzers fixiert oder horizontal im Blickfeld des Anwenders platziert werden. Der standardgemäß eingestellte „Tag along“-Modus folgt dem Sichtfeld bzw. dem sogenannten „Field of view“ des Nutzers (HoloLens 1: 34°). Die 1. Generation der HoloLens weist mit 1280×720 Pixel (pro Auge) und durch ihre binokulare Visualisierung eine große Bildschirmauflösung auf und liegt damit über dem ergonomischen Richtwert von 1600×1200 Pixel für ein 21-Zoll-Display (vgl. DGUV Information 215-410, 2019). Durch eine automatische Pupillen-Entfernungs-Kalibrierung werden die holografischen Informationen bei entspannter Mittellage der Augen ca. 15° unterhalb der horizontalen Blickachse visualisiert. Durch den Tag-along-Modus ist das Sichtfeld der HoloLens der Sehrichtungsklasse III (geeignete Sicht auf LCD-Display bei beweglicher Kopfposition) zuzuordnen.

Mit der **Betätigbarkeit** wird eine intuitive Ausführung der Funktionen angestrebt. Mit der HoloLens wird im vorliegenden Praxisbeispiel gesten-gesteuert interagiert. Diese (neuartige) Interaktionsweise bedingt, dass nicht zwingend von einer intuitiven Bedienung ausgegangen werden kann, sondern vielmehr eine Einweisung sowie ein Gewöhnungsprozess erfolgen muss. Durch die Einblendung von 3D-Hologrammen der Maschine bzw. Werkzeuge werden außerdem reale (zu rüstende) Elemente durch virtuelle (CAD-)Daten ergänzt, um dem Nutzer eine unmissverständliche und unmittelbare Funktionsdurchführung zu gewährleisten (siehe Abb. 8.13).

Diese Gestaltungsmaßnahme unterstützt zudem das Prinzip der **räumlichen Kompatibilität**. Durch diese Visualisierungsart, die durch eine dynamische Anzeige der Montagebewegungsrichtung der einzelnen Werkzeuge ergänzt wird, werden außerdem bewegungskompatible Merkmale gewährleistet. In den Interfaces der Rüstapplikation werden multimediale bzw. text-, bild- und video-basierte Inhalte zum jeweiligen Rüstschritt dargestellt. Durch diese visuelle Darbietung der prozessrelevanten Informationen, die räumlich-analoge Verarbeitung der Informationen sowie die

geforderte und durch den Montageprozess realisierte manuelle Reaktion konnte außerdem eine modalitätsbezogene Kompatibilität generiert werden.

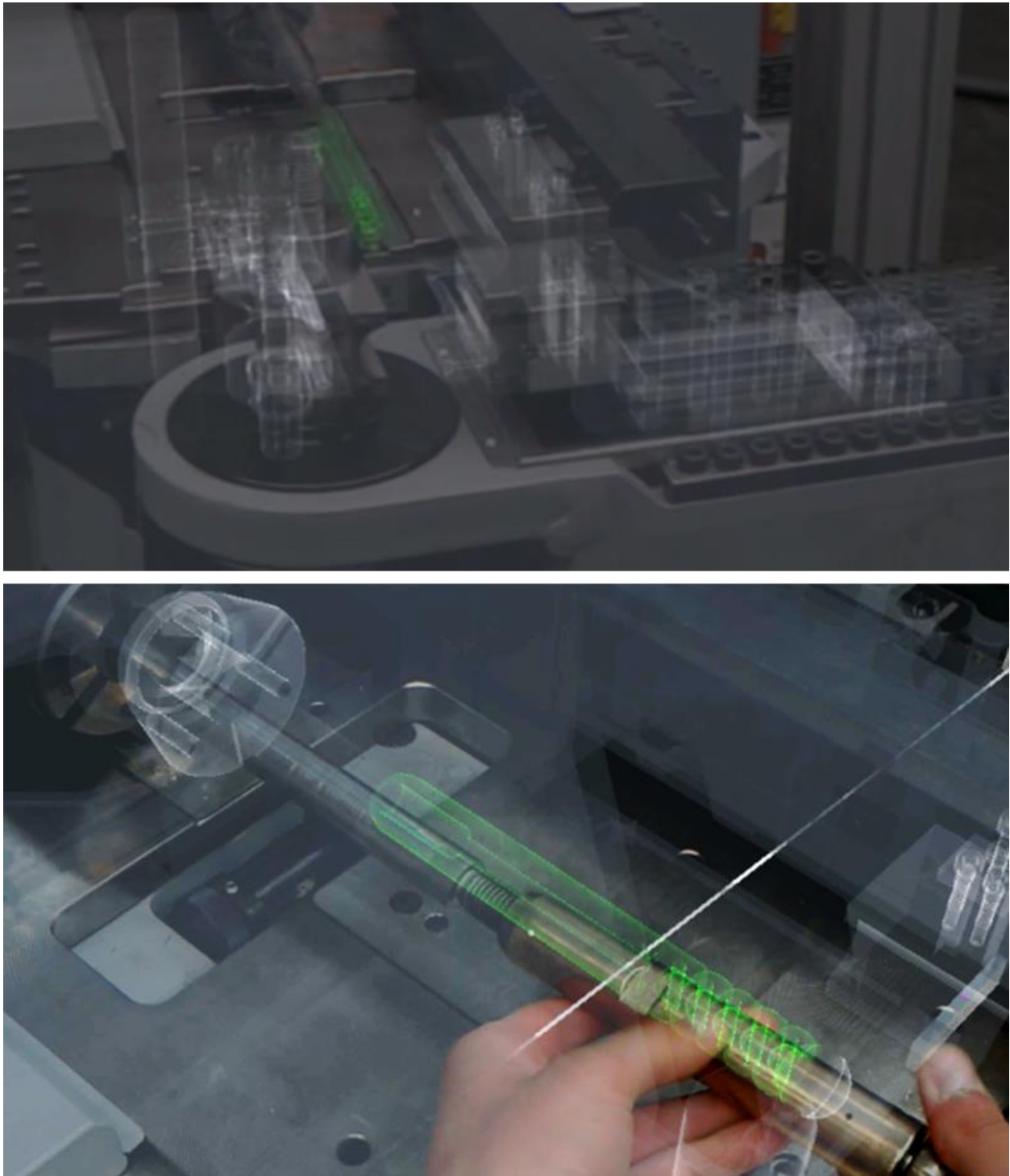


Abb. 8.13: Wiedergabe der erstellten werkzeugspezifischen Rüstdaten in Form eines interaktiven 3D-Hologramms am Beispiel des Biegedorns

Der Mensch kann zu bestimmten Gegebenheiten verschiedene Teilreize miteinander verbinden und diese im besten Fall nach Homogenitätsmerkmalen **gruppieren**. Dieser Vorgang trägt zu einer effizienteren Informationsübermittlung an den Nutzer bei. Durch die Platzierung der einzelnen

Interfaces in unmittelbarer Nähe zueinander und zum Montageort werden diese als zusammengehörige Gruppe wahrgenommen. Die in ihrer Struktur identische Gestaltung der Basis-Hologramme verfolgt außerdem das Prinzip der Ähnlichkeit. Durch klare Konturen und Trennlinien werden außerdem die Gesetze der guten Gestalt sowie der Geschlossenheit beachtet. Der Nutzer wird damit Schritt für Schritt durch die Arbeitsaufgabe geführt, sodass außerdem das Gesetz der Kontinuität bzw. Fortsetzung implementiert wurde. Das Prinzip der gemeinsamen Bewegung wird dadurch beachtet, dass die Hologramme dem Blickfeld des Nutzers folgen.

Ferner soll die **Kodierung** zur Verbesserung einer visuellen und taktilen Erkenn- und Unterscheidbarkeit der Anzeigen und Stellteile beitragen. Darüber hinaus sollten Informationen derart dargestellt werden, dass eigenständige Elemente bzw. Gruppen eindeutig voneinander zu unterscheiden sind. In Bezug auf das vorliegende Beispiel wird keine haptische Interaktion, sondern vielmehr eine gesten-gesteuerte Interaktion berücksichtigt. Das „klassische“ analoge Stellteil wird in diesem Fall also durch ein digitales Eingabegerät oder ein interaktives Steuer- oder Bedienelement in einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) mittels allgemein bekannter Symbole oder Piktogramme ersetzt. Somit können auch weniger technik-affine Personen oder solche, die der Systemsprache nur unzureichend mächtig sind, prozesssicher mit der Applikation interagieren.

Bestimmte Symbole bzw. Piktogramme sind durch ihren Bekanntheitsgrad unmissverständlich (siehe Abb. 8.14). Dazu zählen u. a. Symbole für das Stoppen (siehe Abb. 8.14, a), Pausieren (siehe Abb. 8.14, b) und Abspielen (siehe Abb. 8.14, c) des jeweiligen Rüst- oder Montagevideos oder ein in Linksrichtung gesetzter Pfeil (siehe Abb. 8.14, d), der den Nutzer zum zuvor eingesehenen Fenster bzw. zum vorherigen Rüstschritt führt.



Abb. 8.14: Unmissverständliche Piktogramme bzw. Symbole

Bei der Kodierung mittels **Farbe** wurde zunächst darauf geachtet, dass die Interfaces als reiz-kompatible sensorische Nahtstelle in einem Mensch-Maschine-System möglichst eine Minimierung des Umadptionsaufwands des Auges beim Blickwechsel von den holografischen Inhalten auf die Realumgebung bzw. die Maschine und Werkzeuge garantieren können. Dazu wurden den Anforderungen an elektronische optische Anzeigen entsprechend eine in Grautönen gehaltene

Negativdarstellung (vgl. DIN EN ISO 9241-303, 2011) sowie große und helle oder weiße Beschriftungen (vgl. DIN EN ISO 9241-112, 2017) gewählt, die in Kombination eine ausreichend kontrastreiche Darstellung und Unterscheidbarkeit der holografischen Inhalte bieten. Während sich Positivdarstellungen für hell adaptierte Augen eignen, sind dunkel adaptierte Augen der Negativdarstellung zuträglich. Da die Hologramme mit einem additiven Lichtsystem erstellt werden, ist heller bzw. weißer Text gut lesbar. Somit kann der Nutzer die Inhalte besser fokussieren und wird weniger durch Umgebungseinflüsse abgelenkt. Darüber hinaus wurde eine angemessene und einheitliche Auswahl von Farben, wie z. B. grau, grün und blau, berücksichtigt. Damit soll einerseits eine beruhigende psychische Stimmungslage erzeugt werden (vgl. BULLINGER, 1994) und andererseits eine Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte, des Kontrastes und der Farbe in Abhängigkeit der sich ständig ändernden Sehrichtung gewährleistet werden (vgl. DIN EN ISO 9241-303, 2011). Für die Erstellung der Rüstinstruktionen sind für die einzelnen Maschinen-, Werkzeug-, Programmierungs- und Prüfvorrichtungskomponenten multimediale Inhalte vorzusehen. Bspw. müssen für Werkzeugkomponenten Montagerichtungen in horizontaler oder vertikaler Richtung definiert werden (siehe Abb. 8.15). Das ausgewählte Werkzeugelement wird dabei grün, die Achsrichtungen grau und die angewählte Achse in einem helleren Blauton visualisiert. Während der Nutzung des „Lesen“-Modus, d. h. während des laufenden Rüstvorgangs, wird dann das aktuell zu rüstende Werkzeug in der Farbe „Grün“ hervorgehoben, während die übrigen Werkzeuge in „Weiß“ gekennzeichnet sind (siehe Abb. 8.13). Die Deckkraft der Hervorhebungen ist gering gehalten, um Blendung zu vermeiden.

Sobald eine Interaktionsschaltfläche, wie bspw. das Abspiel-Widget des Videos, mit dem Gaze Point angewählt wird, hebt sich das Icon farblich (in einem leichten Gelbton) von den blau-grauen Symbolen ab. Als nachteilig ist in diesem Zusammenhang jedoch zu erwähnen, dass sich der weiße Gaze Point insbesondere mit dem Video-Steuer-element, das ebenfalls weiß dargestellt wird, kontrastlos überlagert (siehe Abb. 8.16).

Nach DIN EN ISO 9241-303 (2011) erfüllt die gewählte serifenfreie Schriftart „Arial“ weiterhin ergonomische Anforderungen hinsichtlich des Zeichenabstands sowie der Nutzerakzeptanz für elektronische optische Anzeigen. Für HMDs existieren hinsichtlich der Schriftgröße bisher weder in Teil 303 (2011) und Teil 307 (2008) der DIN EN ISO 9241 noch in der DGUV-Information 215-410 (2019) entsprechende Vorgaben. Das Hologramm der HoloLens erscheint dem Nutzer in 45 cm Abstand zur Linse. Im Vergleich zu Richtlinien, die für Bildschirme gelten, konnte mit einer Zeichenhöhe von 5,5 mm und einem Schriftgrad von 15 Punkten für das vorliegende Szenario eine bequem lesbare Zeichengröße geschaffen werden.

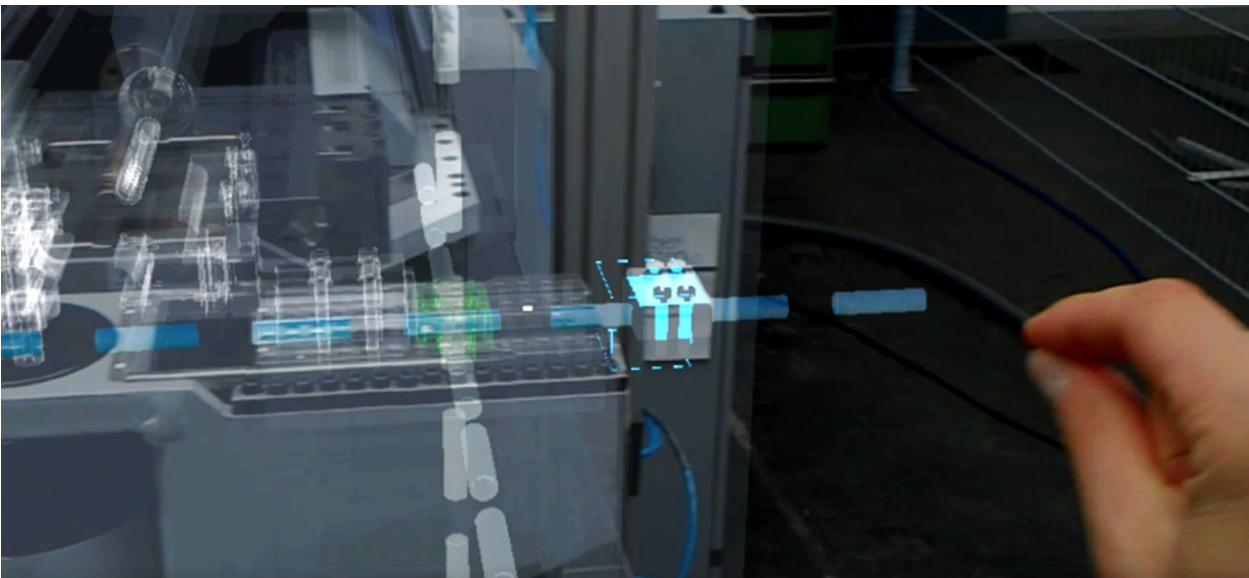


Abb. 8.15: Festlegung der Interaktionsrichtung für eine Werkzeugkomponente am Beispiel des Schiebers

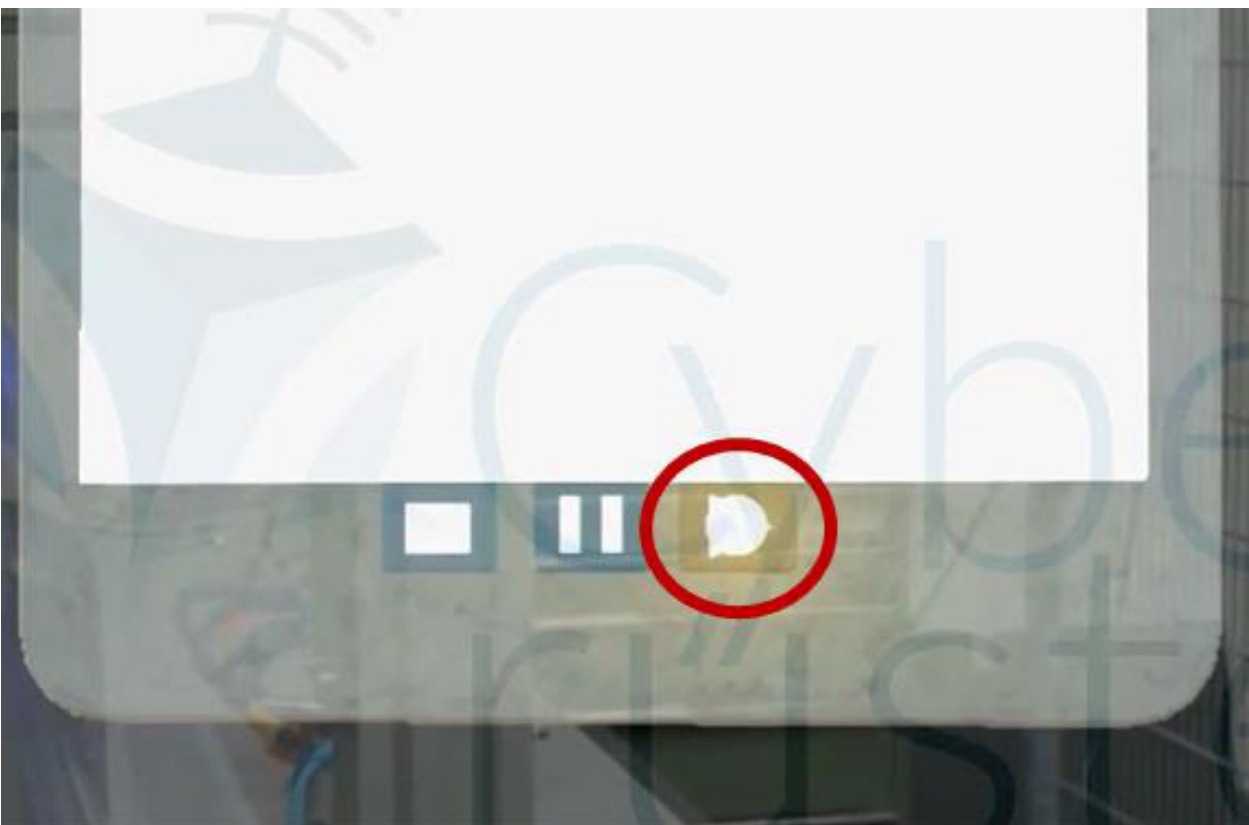


Abb. 8.16: Kontrastlose Überlagerung des Gaze Points mit einer Interaktionsschaltfläche

Software-ergonomische informatorische Gestaltung

Die verwendete Applikationssoftware „Expert to Go“ ist u. a. ***aufgaben-angemessen***, da sie den Nutzer anhand der Basis-Hologramme schrittweise durch den Rüstprozess leitet. Die multimedialen und kontextspezifischen Informationen zur Nutzer-System-Interaktion basieren auf den

charakteristischen Eigenschaften der (Rüst-)Aufgabe und liefern eine kompakte Informations- und Aktionsdichte. Über das Home-Menü kann der Maschineneinrichter jederzeit die bisher benötigte Rüstzeit einsehen. Sie startet mit der Artikelauswahl und endet mit dem Abschluss des Rüstvorgangs. Die beschriebenen Aspekte tragen außerdem zu einer Aufwandsoptimierung im Zuge der Aufgabenerledigung bei. Anzulernende Maschineneinrichter können bei der Auswahl des ab- und aufzurüstenden Artikels auf bestehende, durch erfahrene Maschineneinrichter bzw. Vorgesetzte angelegte Rüstinstruktionen zurückgreifen.

Die sich im Sichtfeld befindlichen Hologramme inklusive der darin implementierten Buttons bzw. der vorhandenen Auswahlfunktionen, die zusätzlich durch Hilfefunktionen in Form von Tooltips ergänzt wurden, sind eindeutig ersichtlich und damit *selbstbeschreibungsfähig*. Der Nutzer kann darüber hinaus mithilfe der Schritt-für-Schritt-Anzeige und durch das „Augmented Machine“-Prinzip als eine Art „Breadcrumb trail“ jederzeit den aktuellen Prozessstatus und -fortschritt einsehen.

Aus dem Arbeitsgebiet „Rüstprozess“ – insbesondere in Bezug auf spezifische Maschinen- und Werkzeugelemente des Rotationszugbiegens – verwendete Begriffe, wie „Montageposition“, „Dorn“, „Bolzen“, etc., Bezeichnungen und Konventionen sowie die schrittweise Anleitung zum Rüstprozess einer Produktionsmaschine sind *erwartungskonform*, da sie eine aufgaben- und nutzungsreihenfolge-bezogene Strukturierung verfolgen. Ferner ist eine eindeutige Interpretierbarkeit der Informationen hinsichtlich einer interkulturellen Verständlichkeit sowie der Verwendung von medialen Inhalten bzw. dynamischen Medien gegeben. Die Montagepositionen der einzelnen Werkzeuge können zudem mithilfe einer über dem Montageraum platzierten 3D-Kamera überprüft und an den Nutzer zurückgemeldet werden, damit dieser etwaige fehlerhafte Positionen korrigieren kann. Weiterhin leuchten angewählte Widgets auf, sodass eine sofortige und angemessene Rückmeldung auf Nutzerhandlungen generiert wird. Dateneingaben, wie bspw. die Änderung eines Artikelnamens, können mithilfe einer digitalen Tastatur erfolgen, die den lokalen Sprachkonventionen einschließlich sprachspezifischer Buchstaben entspricht. Das System ermöglicht dem Nutzer durch Aufbau und Struktur eine konsistente und routinierte Arbeitsausführung über vergleichbare Rüstvorgänge hinweg.

Der Maschineneinrichter ist in der Lage, das System flexibel und individuell zu steuern. Neben einem beliebigen schrittweisen Wechsel der Rüstschritte können Fenstergrößen skaliert respektive angepasst sowie Hologrammpositionen und -ansichten verändert werden. Es obliegt dem Nutzer, ob und wie bzw. in welchem Ausmaß er die zur Verfügung stehenden Instruktionen nutzt. Bspw. kann der Maschineneinrichter das Video beliebig oft ansehen. Ein weiterer Aspekt ist, dass zu-

gunsten der Interaktions-Geschwindigkeit Suchfunktionen mit integrierter Auto-Vervollständigungsfunktion implementiert wurden, z. B. bei der Auswahl des gewünschten Artikels. Außerdem können u. a. Hintergrund-, Fokussierungs- und Schriftfarbe gemäß der ArbStättV individuell konfiguriert werden.

Das CPPS-Tool unterstützt den Nutzer bei der Entdeckung seiner Fähigkeiten sowie hinsichtlich eines *Lerneffekts*. Zunächst liegt der Schwerpunkt der Aufmerksamkeit auf den im oberen Sichtfeld zentriert dargestellten Informationen. In diesem Zusammenhang kann der Nutzer Informationen wiederholt abrufen, wie z. B. das Video des jeweiligen Rüstschritts. Bei jeder Eingabe des Nutzers gibt das System ein akustisches Signal wieder, sodass eine erfolgreiche Interaktion bestätigt wird.

Durch eine sensorische Prüfung der Positionen der montierten Werkzeuge hat der Maschineneinrichter weiterhin die Möglichkeit, den Prozess zu explorieren und letztlich zu optimieren. Die kontextspezifische, detaillierte und problemorientierte Aggregation von realen und virtuellen Daten – zusammen mit sensorischen Eingangswerten zum Rüstprozess – trägt aufgrund einer entsprechend guten Datenstruktur dazu bei, dass eine lernfreundliche Umgebung geschaffen wird. Weiterhin wird hinsichtlich der Rüstanweisungen im Sinne eines Best-Practice-Ansatzes ein iterativer Ansatz verfolgt, der es erlaubt, diese Instruktionen auch mithilfe von Sensortechnologie zu evaluieren und zu modifizieren. Durch die sensorbasierte Bewegungsverfolgung oder das „Wegtracking“ der HoloLens können im Zuge des Rüstvorgangs entstandene Laufwege aufgezeichnet und in Form eines Videos oder eines Spaghetti-Diagramms ausgegeben werden. Der implementierte Tablet-Client (siehe Abb. 8.17) ermöglicht im Sinne einer Konfiguration auf Grundlage dieser Daten eine Optimierung der Rüstschrittreihenfolge gemäß dem SMED-Prinzip. *Fehler* können durch die beschriebenen Unterstützungsmerkmale des „Expert to Go“, u. a. durch die Darstellung aufgabenbezogener Informationen zur Minimierung von Ablenkungen, vermieden werden. Sollten Werkzeuge dennoch fehlerhaft gerüstet worden sein, werden diese durch eine sensorische Überprüfung (der Werkzeugposition) aufgedeckt, um sie anschließend beheben zu können. Eine Tolerierung fehlerhafter Positionen könnte zu einer kostspieligen Zeit- und Ressourcenverschwendung im weiteren Prozessverlauf führen. In Bezug auf die Interaktion mit den Interfaces kann das versehentliche Schließen eines Hologramms durch das Home-Menü rückgängig gemacht werden.

Anzeige der Rüstschritte: 1-3

Zurück	Weiter
<p>Schritt 1 Dorn Preparing - Projektbiegebauteil Rüstzeit: 86,9 Weglänge: 1 Erst Schritt... Danach Schritt...</p>	<p>Schritt 3 Passfederring Wafios Preparing - Projektbiegebauteil Rüstzeit: 82,21 Weglänge: 0 Erst Schritt... Danach Schritt...</p>
Speichern	Beenden

Vertauschen	Vertauschen
<p>Schritt 2 Faltenblätter incl. Aufnahme und Befestigung Preparing - Projektbiegebauteil Rüstzeit: 62 Weglänge: 0 Erst Schritt... Danach Schritt...</p>	<p>Schritt 3 Passfederring Wafios Preparing - Projektbiegebauteil Rüstzeit: 82,21 Weglänge: 0 Erst Schritt... Danach Schritt...</p>

Abb. 8.17: Visualisierung der Rüstschritte auf einem Tablet zum kollaborativen Editieren der Rüstinstruktionen

Der Nutzer erhält nach erfolgreicher Durchführung des Rüstprozesses ein Feedback zur Montageposition der einzelnen Werkzeuge. Wenn der Sensor keinen Fehler erkennt, ist der mechanische Rüstvorgang abgeschlossen. Dem Nutzer wird damit eine erfolgreiche Arbeit bescheinigt. Durch die kontextsensitive Bereitstellung der Daten und ihre Ausrichtung auf die Unterstützung von Schlüsselementen der Entscheidungsfindung wird eine Komplexitätsreduktion erreicht. Dadurch werden keine unverhältnismäßigen Anforderungen an den Nutzer gestellt.

Die Neuartigkeit des HMDs mitsamt der notwendigen Interaktion und der intuitiven Bedienbarkeit führen weiterhin dazu, dass das interaktive System für die Anwender attraktiv ist. Die Maschineneinrichter werden außerdem stark in das System eingebunden. Während erfahrene Maschineneinrichter Instruktionen erstellen oder anlegen, können anzulernende Bediener diese ohne Probleme nutzen. Beide Parteien haben ergänzend dazu die Möglichkeit, bspw. mithilfe des Tablet-Clients, Optimierungen bzw. Anpassungen kollaborativ zu erarbeiten und das System somit laufend zu verbessern. Diese kooperative Zusammenarbeit sowie die jeweils zugeordneten Rollen tragen zu einer *Motivationssteigerung* bei.

8.3 Evaluierung eines AR-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems für industrielle Rüstprozesse in einer natürlichen Umgebung

Die auf dem Transfer von Wissen und Fachkenntnissen basierende Unterstützung des AR-CPPS manifestiert sich in der praktischen (Rüst-)Anwendung in unterschiedlichen Themen. Sie bietet eine einfache und flexible Möglichkeit propositionales und in Handlungen verkörpertes Wissen aufzuzeichnen, zu bearbeiten, zu teilen und darauf zuzugreifen.

Zunächst können durch die System-Nutzung sowohl erfahrene als auch unerfahrene Maschineneinrichter *zeitliche Kapazitäten einsparen*. Erfahrene Arbeitspersonen wenden einen Großteil ihrer Zeit damit auf, unerfahrenen Bedienern prozessspezifische Hilfestellungen zu geben, z. B. hinsichtlich der einzusetzenden Werkzeuge und verschiedener Handgriffe. Die Speicherung und Verfügbarmachung derartiger standardisierter Hilfestellungen geht mit einer Zeitersparnis für die erfahrenen Maschineneinrichter einher, da einzuarbeitende (unerfahrene) Kollegen diese Instruktionen in beliebiger Frequenz einsehen können, ohne ihren Vorgesetzten oder Kollegen konsultieren zu müssen (vgl. NILSSON & JOHANSSON, 2008). Dieser Sachverhalt wurde sowohl von einem erfahrenen Maschineneinrichter („*Ich kann davon profitieren, denn wenn meine Kollegen mit der HoloLens arbeiten, muss ich mich nicht immer um sie kümmern und kann mich auf andere Aufgaben konzentrieren.*“, TN20) als auch von einer weniger erfahrenen Arbeitsperson („*Mit dem System können die erfahrenen Kollegen dann entlastet werden.*“, TN21).

Eine Evaluierung innerhalb einer realen Industrieumgebung bei verschiedenen Unternehmen zeigt, inwieweit sich die **digitalen AR-Inhalte in die Arbeitsumgebung einfügen und an die Arbeitspraktiken anpassen** müssen. Zum einen muss die AR-Visualisierung die händische bzw. manuelle Arbeit bestmöglich unterstützen, indem sie dem Maschineneinrichter ermöglicht, die Rüst-Informationen parallel zur eigentlichen Tätigkeit einzusehen, wie durch TN4 bekräftigt wurde:

„Eine synchrone Nutzung der Anleitung während der Arbeitstätigkeit, die erlernt werden muss, erfordert ein ausgeprägtes Maß an Konzentration. Die einfache Darstellung der Hologramme sorgte dafür, dass der Umgang mit der HoloLens leicht verständlich erfolgt“.

Weiterhin muss sichergestellt werden, dass der Nutzer seine periphere Umgebung wahrnehmen kann und Arbeitsunfälle durch eine etwaige Kollision einer Arbeitsperson mit in den Arbeitsbereich hineinragenden Maschinenteilen o. Ä. vermieden werden:

„Je nachdem, wo man sich in der Maschine befindet, kommt einem der Gedanke in den Sinn: ‚Hoffentlich stoße ich mit nichts zusammen.‘ Das ist bei unseren Maschinen und Werkzeugen besonders gefährlich. Da gibt es Säulen und andere Bauteile, die in den Arbeitsbereich hineinragen“ (TN39).

Die Verwendung von AR-basierten Anweisungen trägt außerdem zu einer **Förderung des selbstständigen Lernens am Arbeitsplatz** bei. In Produktionsumgebungen können Leistungsverbesserungen durch standardisierte Lern- und Arbeitsprozesse generiert werden (vgl. SHINGO, 1985). TN38 bestätigt diesen Zusammenhang:

„Die Technologie könnte die Aufrechterhaltung des etablierten Standards garantieren. Dass alle Mitarbeiter das Gleiche lernen. Ein neuer Standard kann leicht mit einer Brille definiert und dann schnell konsumiert werden. Der direkte Soll-Ist-Vergleich der Hologramme mit der realen Rüstprozessumsetzung ist wünschenswert“.

Darüber hinaus präferieren die Maschineneinrichter durch eine ständige Präsenz der Anweisungen und einen personenunabhängigen bzw. unabhängig von der individuellen Auffassungsgabe des Nutzers ausgerichteten Zugang zu den Rüstinformationen eine Unterstützung des autonomen Lernens (vgl. BRESCIANI & EPPLER, 2009; PAAS et al., 2003):

„So können auch Personen, die nicht so schnell lernen können, die Einrichtung vornehmen. Es ist also sehr praktisch, und Personen, die sich mit dem Einrichten etwas schwerer tun, haben immer Zugang zu allen Einrichtungsinformationen und können diese bei Bedarf abrufen“ (TN32).

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Produkt- und Variantenvielfalt (vgl. ÇAKMAKCI, 2009) können selten durchgeführte Rüstvorgänge auch erfahrenen Maschineneinrichtern helfen, sich aktiv an Rüstprozesse zu erinnern:

„Es ist mir schon einmal passiert, dass ich ein sehr seltenes Produkt rüsten musste. Da musste ich nachdenken und mich an den Einrichtungsprozess erinnern. Diese Art der Unterstützung bei der Einrichtung ist hilfreich und gibt eine gewisse Sicherheit“ (TN35).

Die Nutzung derartiger Unterstützungssysteme birgt allerdings auch die Gefahr, dass durch die ständige Verfügbarkeit der HoloLens ein zu stark ausgeprägtes Gefühl der Sicherheit entsteht, das wiederum zu einem mangelnden Aufbau von eigenem Prozesswissen führen kann. TN38 unterstreicht diesen Aspekt:

„Wenn ich die HoloLens benutze und den Einrichtungsprozess erfolgreich durchgeführt habe, dann habe ich eigentlich nur die Anleitung befolgt und nichts selbst gemacht. Ich musste mir dann selbst keine Gedanken machen und baue somit auch kein Wissen auf, weil ich weiß, dass die HoloLens immer verfügbar ist“.

Obwohl die Studienteilnehmer keinerlei Erfahrungen mit Head-Mounted-Display-Technologien aufwiesen, konnten sie durch eine einfache und störungsminimale Bedienbarkeit problemlos mit dem System interagieren. Dieser Sachverhalt wurde auch in der einschlägigen Literatur anerkannt (vgl. BHATTACHARYA & WINER, 2019; MOHR et al., 2015). Die Möglichkeit, Bilder, Videos und holografische Darstellungen zu erstellen und einzusehen, um Details spezifischer Rüstschritte zu demonstrieren, wurde ergänzend dazu als sehr positiv wahrgenommen:

„Das Video gibt Tipps und Tricks. Die AR-Präsentation und die Animationen, die ich hinzugefügt habe, sind eher die Grundlagen“ (TN30).

Die multimediale Struktur unterstützt die Organisation dabei, eigene implizite und explizite Wissensbestandteile aufzubauen (vgl. BLOODGOOD & SALISBURY, 2001). Insbesondere die Videos sind in der Lage, einen prozesssicheren Umgang mit Werkzeugen darzustellen und somit Know-how zu vermitteln, das mit anderen, statischen Medien nur bedingt visualisiert werden kann. Die dreidimensionale Animation der Werkzeug-Hologramme und deren Montagerichtung ist aufgrund technischer Einschränkungen des Systems nicht mit einer größtmöglichen Positionierungs-Genauigkeit ausgestattet, wie TN36 bemerkte:

„Die Genauigkeit der Anweisungen ist nicht ausreichend. Ich habe nur ungefähr gesehen, wo es hingehen soll. Aber wo genau, das sehe ich nicht. Ich habe gesehen, dass es irgendwo in die Mitte kommt, aber mehr nicht. Ich muss jede Schraube erkennen“.

Wie ebenfalls von NEWELL et al. (2001) festgestellt werden konnte, können AR-basierte Anweisungen kleine geometrische Unterschiede, die sich auf die Aufgabenleistung auswirken, nicht sichtbar machen. Holografische Instruktionen garantieren also nicht zwangsläufig eine bestmögliche Unterstützung im Rahmen von Montagetätigkeiten (vgl. WERRLICH et al., 2018; KOSSLYN, 2006). Um Qualitätsstandards der richtungsorientiert zu montierenden, aber nahezu symmetrisch aufgebauten, Werkzeugelemente einzuhalten, sind **technologische Einschränkungen durch ergänzende Informationen zu kompensieren**. Die Wiedergabe des Videos ergänzt in jedem Fall die mithilfe des Systems erstellten AR-Animationen und bietet zusätzliche Prozesssicherheit. Die so erreichte Sicherheit steht jedoch im Gegensatz zur geforderten Rüstzeit. Trotz der Unzulänglichkeiten in Bezug auf die Genauigkeit der mit Hilfe des getesteten Systems erstellten Hologramme, zeigten die Teilnehmer Vertrauen in das Potenzial des Tools, wie an einer beispielhaften Aussage eines erfahrenen Maschineneinrichters deutlich wird:

„Man kann schon Erfahrungen übertragen. Die meisten Inhalte werden durch das Video erfasst. Ich kann diese Videoaufzeichnung und -erstellung in meinen Arbeitsalltag integrieren“ (TN27).

Das konzipierte Tool erlaubt im Zuge der Erstellung von AR-Hologrammen die Anzeige von CAD-Daten und das Hinzufügen von linearen Animationen der einzelnen Werkzeuge und ihrer Unterbaugruppen, wie z. B. Schrauben und Unterlegscheiben. TN35 betont, dass diese Darstellung nicht in sämtlichen Rüst Szenarien ausreichend ist und bspw. Kontaktpunkte bzw. -flächen zwischen einem zu montierenden Bauteil und einem bereits montierten Werkzeug nicht eindeutig ersichtlich sind:

„Schiebebewegungen sind einfach und leicht zu erkennen. Wir haben aber Fälle, in denen sich mehrere Bewegungsarten überlagern und für die korrekte Montage entscheidend sind. Nur wenn wir auch diese darstellen, können wir dem Neuling einen reibungslosen Aufbau ermöglichen“.

Das **flexible Autorenkonzept**, das auf der Darstellung von CAD-Daten basiert, wird jedoch grundsätzlich als positiv empfunden, da „[die] Hologramme geometrische Details der Werkzeuge erkennen lassen“, wie TN 35 weiter ausführte.

Etwaige durch die Aufnahme eines Videos entstehende Unsicherheiten („Bei dem Video war ich mir im Nachhinein nicht mehr sicher, ob ich den Prozess richtig aufgezeichnet habe. Letztlich kann ich das nur überprüfen, wenn ich die Anleitung selbst verwende. Deshalb muss ich die Möglichkeit haben, die Inhalte zu korrigieren“, TN37) sollten durch mögliche **Analyse- und Korrekturmaßnahmen des rüstspezifischen Inhalts** behoben werden können. Die Konfiguration des Rüstprozesses wird als sinnvoll erachtet, da sie einen SMED-ähnlichen Ansatz verfolgt (vgl. SHINGO, 1985). Zunächst sind die aufgenommenen Inhalte vor der Weitergabe zu überprüfen. Die ggf. geänderten Instruktionen können kollaborativ angepasst und unmittelbar auf die Datenbrille übertragen werden. Dass diese Optimierungen durchaus sinnvoll sind, verdeutlicht TN26:

„Die Analyse der Rüstvorgänge anhand von Wegen, Wegzeiten und Rüstzeiten ist hilfreich und findet bei der Analyse und anschließenden Optimierung des Rüstvorgangs statt. Das ist wichtig, weil wir immer unter Zeitdruck stehen“.

Die wirtschaftliche Notwendigkeit einer kontinuierlichen Verbesserung des Rüstprozesses wird vor dem Hintergrund des internationalen Wettbewerbs und der zunehmenden Produktvielfalt hervorgehoben (vgl. LUDWIG et al., 2016; ÇAKMAKCI, 2009; VAN GOUBERGEN & VAN LANDEGHEM, 2002). TN39 zeigt bspw. auf, dass die unterschiedlichen Erfahrungen und Vorgehensweisen der Maschineneinrichter berücksichtigt werden sollten:

„In der Analyse kann man die Vorgehensweisen von Kollegen beobachten, die man selbst nicht durchgeführt hat und nie darüber nachgedacht hat. Aber sie sind gar nicht so schlecht und man kann daraus einen neuen Maßstab ableiten“.

8.4 Arbeitsplatzbewertung eines Rüstvorgangs anhand ausgewählter Verfahren

Die Arbeitsplatzbewertungsverfahren zeigen anhand der LMM als spezielles Screeningverfahren und mithilfe der EAWS als Experten-Screening-Verfahren auf, welche Tätigkeiten im Zuge des Rüstvorgangs von industriellen Fertigungsmaschinen am Beispiel des Einrichtens einer Rotationszugbiegemaschine Risiken bergen – sowohl im Umgang mit einem AR-basierten Unterstützungssystem als auch bei der Nutzung einer Papierinstruktion. Somit können potenzielle Verbesserungen der Arbeitsbedingungen aufgedeckt werden. Der Fokus der Analyse ist auf die reproduzierbaren bzw. statischen Rüstanteile ausgerichtet, die in gleicher Weise Bestandteil der zweiten experimentellen Studie waren und somit einen exemplarischen Ausschnitt eines Rüstvorgangs darstellen. Im Zuge der Analyse werden auch Besonderheiten ersichtlich, die nicht zwingend auf das Arbeitssystem, sondern vielmehr auf den Arbeitnehmer selbst zurückzuführen sind. Das Fehlver-

halten eines Arbeitnehmers stellt trotz der Möglichkeit einer sicheren Arbeitsausführung ein gesondertes Risikopotenzial dar, das vor allem durch eine bessere Informations- und Schulungsstruktur innerhalb von Unternehmen angegangen werden muss. Exemplarische Besonderheiten betreffen z. B. unnötige Verdrehungen des Oberkörpers bei schwer zugänglichen Montagevorgängen, die einer starren Einhaltung von Arbeitspositionen geschuldet sind.

Die zeitlichen Rahmenbedingungen werden exemplarisch mit einer 8-stündigen Arbeitsschicht, einer Pausenzeit von insgesamt 55 Minuten (Frühstücks- und Mittagspause sowie etwaige Toilettengänge oder Raucherpausen) festgelegt. Die Rüstvorgänge erfolgen maximal dreimal pro Arbeitsschicht.

Es ist ergänzend festzustellen, dass der Grad der Repetition im Zuge der Rüsttätigkeiten nicht den in der Norm vorgegebenen Beispielen entspricht. Eine Anwendung ist jedoch möglich, da die LMM selbst diesbezüglich keine konkreten Werte vorgibt und die vorkommenden Belastungsarten den Verfahren zugeordnet werden. Ähnliches gilt für das EAWS-Verfahren. Für den Bewertungs-Abschnitt der repetitiven Tätigkeiten werden zwar Orientierungswerte für hohe Wiederholungszahlen vorgegeben, allerdings beschreiben sie nur ein kritisches Maximum, welches mit äußerster Wahrscheinlichkeit ein Risiko bedeutet. Tätigkeiten, die im Rahmen des EAWS nicht häufig genug auftreten, fallen automatisch durch das vorgegebene Bewertungsraster.

8.4.1 Leitmerkalmethode

Nachfolgend werden die Bewertungsschritte zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen aufgeführt und erläutert. Die zusammenfassenden Formblätter der Leitmerkalmethode sind Anhang E (Abb. E6-E9) zu entnehmen. Da sich die zu montierenden Elemente in einem Werkzeugwagen bzw. auf einem Shadowboard unmittelbar in Maschinennähe befinden, können logistische Tätigkeiten und zu vollführende Laufwege vernachlässigt werden. Die spezifischen Werte der jeweiligen Bewertungskategorien werden nachfolgend beschrieben und anhand tabellarischer Übersichten sowie bildhafter Darstellungen exemplarisch verdeutlicht.

Bestimmung der Zeitwichtung (Schritt 1)

Die Bestimmung der Zeitwichtung berücksichtigt, welchen Anteil der betrachtete Prozess an der Gesamtdauer einer Arbeitsschicht einnimmt. Der Rüstvorgang einer Fertigungsmaschine erfolgt im Vergleich zu produzierenden Tätigkeiten, die durch eine hohe Repetition charakterisiert sind, in der Regel in einer verminderten Regelmäßigkeit. Im vorliegenden Kontext werden Biegemaschinen durchschnittlich drei Mal pro Arbeitstag gerüstet. Die Zeiten des Rüstvorgangs können durch unterschiedliche Einflussparameter, wie z. B. Maschinengröße, Fähigkeiten der Maschineneinrichter oder Arbeitsumgebungsbedingungen, stark variieren. Der Rüstvorgang einer „kleinen“

Rotationszugbiegemaschine (Wafios RBV35) bedarf einer Durchführungszeit von 18 (Papierinstruktion) bzw. 20 Minuten (HoloLens), sodass eine tägliche Gesamtzeit von maximal 54 bzw. 60 Minuten resultiert. Gemäß der Bewertungsskala der LMM wird die Zeitwichtung für die papierbasierte Variante mit 0,9 Punkten und für die holografisch orientierte Unterstützung mit einem Punkt versehen.

Bestimmung der Wichtungen von Art der Kraftausübung, Greifbedingungen, Arbeitsorganisation, Ausführungsbedingungen, Körperhaltung und Hand-/Armstellung und -bewegung (Schritt 2)

Im Rahmen der Erfassung der ***Kraftausübungsarten im Finger-Handbereich*** erfolgt eine Unterscheidung zwischen linker und rechter Hand sowie zwischen statischen oder dynamischen Kraftausübungen, die durch eine mittlere Haltedauer und mittlere Bewegungshäufigkeiten sowie die jeweilige Kraftintensität beschrieben werden.

Sämtliche Rüstutensilien nehmen ein kumuliertes Maximalgewicht von ca. 3,4 kg an. Die Krafteinstufung der Objekte bis zu einer Masse von 0,5 kg werden als „sehr gering“ gekennzeichnet. Das Umsetzen eines Innensechskant-Schlüssels kommt bspw. einer sehr geringen Kraftausübung gleich. Werkzeuge und Montagehilfsmittel von 0,5 kg bis maximal 3 kg (z. B. Biegedorn) werden als „geringe“ Kräfte eingestuft. Ab 3 kg werden die Objekte in die Kategorie der mittleren Kräfte eingeordnet.

Haltevorgänge sind als solche zu deklarieren, wenn sie für mindestens vier Sekunden statisch ausgeführt werden, ohne einen Umsetzvorgang durchzuführen. Maschineneinrichter halten bspw. ein Montagehilfsmittel über mehrere Arbeitsschritte in einer Hand, ohne Gebrauch davon zu machen. Das Einsehen der HoloLens-Instruktionen bedingt, dass durch das freihändige Arbeiten und das daraus resultierende Halten der Werkzeuge bzw. der Montagehilfsmittel kurze Umsetzvorgänge ausgedehnt und folglich als Haltearbeit kategorisiert werden müssen. Während die kurzzeitigen Interaktionszyklen mit der HoloLens, von denen pro Rüstvorgang ca. 30 (1,5 Interaktionen pro Minute) ausgeführt werden, vornehmlich mithilfe der rechten Hand erfolgen, werden die Haltearbeiten, die eine mittlere Haltedauer von 15 Sekunden pro Minute nicht überschreiten, entsprechend mit der linken Hand ausgeführt. Dabei ist von einem mittleren Kraftniveau auszugehen.

Sämtliche weiteren Tätigkeiten werden als dynamische Prozesse eingestuft und anhand von Bewegungshäufigkeiten gezählt. Sehr geringe Kräfte werden bspw. für das Umsetzen der Montagehilfsmittel eingesetzt, die auch zusammen mit der Datenbrillen-Interaktion i. d. R. weniger als fünfmal pro Minute erfolgen. Die vornehmlich beidhändig erfolgende Sortierung oder Umsetzvorgänge der Werkzeuge ist mitsamt der Auflage- oder Steck Tätigkeiten bei etwa 1,1 (HoloLens) bzw.

1,2 (Papierinstruktion) Aktionen pro Minute einem mittleren Kraftlevel zuzuordnen. Im vorliegenden Rüstkontext bedarf es insgesamt sechs Schraubtätigkeiten, die durch die Maschineneinrichter mehrheitlich mit der rechten Hand ausgeführt werden. Die Montage der Dornstange, der inneren Spannbacke, des Schiebers und des Klemmbocks sind mit einem Montagehilfsmittel (Maulschlüssel respektive Innensechskantschlüssel) durchzuführen. Das Festziehen dieser Schraubverbindungen ist als endgültiger Vorgang einer „Spitzenkraft“ zuzuordnen, der pro Rüstvorgang in 22-facher Ausführung erfolgt und demnach mit Nutzung des HMD 1,1-mal und ohne HMD-Anwendung 1,2-mal pro Minute. Das handfeste und mit moderat bis hohen Kräften versehene Einschrauben der beschriebenen Werkzeuge inklusive des Gewindeeinsatzes der Biegeachse und des Bolzens erfordern einen verminderten Kraftaufwand, der pro Minute holografisch unterstützt 1,75-mal und bei der papierbasierten Anwendung 1,9-mal pro Minute durchgeführt wird. Eine Summierung pro Kraftart und Hand ergibt die in Tabelle 8.2 dargestellte Bewertungsskala zum Leitmerkmal, aus der Wichtungen der Kraftausübung für die rechte Hand in Höhe von 10 und für die linke Hand Punktwerte von 3,5 (HoloLens) bzw. 1 (Papierinstruktion) resultieren.

Die genutzten Werkzeuge und die Montagehilfsmittel wiesen keine speziellen Griffmulden auf, wengleich die Montagehilfsmittel durch ihre Stabform zumindest aus produktergonomischer Sicht verwendbar sind. Die Werkzeuge und Hilfsmittel sind durch ihren täglichen Gebrauch mit einem leichten Öl- oder Schmierfilm versehen. In Summe wird für die **Kraftübertragung bzw. Greifbedingung** somit eine Wichtung von 1,5 Punkten vergeben. Eine Unterscheidung zwischen der Arbeit ohne und mit der Datenbrille ist an dieser Stelle nicht notwendig, da sie keinen Einfluss auf das Leitmerkmal hat.

Für die **Hand- und Armstellungen sowie -bewegungen** können zwar vereinzelt Auslenkungen bis zum Ende des Beweglichkeitsbereichs festgestellt werden, allerdings ist deren Anzahl vergleichsweise gering. Vielmehr werden die einzelne Rüstschritte überwiegend durch Gelenkbewegungen im mittleren bzw. entspannten Bereich ausgeführt und entsprechen somit nicht der durch die LMM vorgegebenen Skalierung von maximalen Gelenkstellungen. Die gestenbasierte Interaktion mit der HoloLens, im Zuge welcher der Arm kranial-ventral auf Gesichtshöhe ausgerichtet wird und Daumen und Zeigefinger zusammengeführt werden, entspricht auch aufgrund der kurzen Zeitdauer von unter vier Sekunden keiner im kritischen Bereich von Endstellungen der Gelenke einzuordnenden Bewegung. Demnach wird das Leitmerkmal für die Datenbrillen-Nutzung mit einer Wichtung von lediglich 1 (Papierinstruktion: 0) bewertet.

Tab. 8.1: Bewertungsskale zum Leitmerkmal „Art der Kraftausübung(en) im Finger-Handbereich in einer ‚Norm-Minute‘“ für den Rüstvorgang ohne (oben) und mit HoloLens (unten)

Art der Kraftausübung im Finger-Handbereich	Papierinstruktion									
	Halten [sec/min]					Bewegen [Anzahl/min]				
	31-60	16-30	3	1,5	≤ 15	< 5	5-15	16-30	31-60	61-90
Sehr geringe Kräfte (bis 15 % $F_{max}M$)	5,5	3	3	1,5	≤ 15	0,5	1	2,5	5	7
Mittlere Kräfte (bis 30 % $F_{max}M$)	9	4,5	4,5	2,5	≤ 15	0,5	2	4	7,5	11
Hohe Kräfte (bis 50 % $F_{max}M$)	14	7	7	3,5	≤ 15	1	3	6	12	18
Sehr hohe Kräfte (bis 80 % $F_{max}M$)	22	11	11	5,5	≤ 15	1,5	5	10	19	
Spitzenkräfte (über 80 % $F_{max}M$)	100			35	≤ 15	8	30		100	
Kräftiges Schlagen					≤ 15	8	30			

Linke Hand	Rechte Hand
1	10

Wichtungen der Kraftausübung

Art der Kraftausübung im Finger-Handbereich	HoloLens									
	Halten [sec/min]					Bewegen [Anzahl/min]				
	31-60	16-30	3	1,5	≤ 15	< 5	5-15	16-30	31-60	61-90
Sehr geringe Kräfte (bis 15 % $F_{max}M$)	5,5	3	3	1,5	≤ 15	0,5	1	2,5	5	7
Mittlere Kräfte (bis 30 % $F_{max}M$)	9	4,5	4,5	2,5	≤ 15	0,5	2	4	7,5	11
Hohe Kräfte (bis 50 % $F_{max}M$)	14	7	7	3,5	≤ 15	1	3	6	12	18
Sehr hohe Kräfte (bis 80 % $F_{max}M$)	22	11	11	5,5	≤ 15	1,5	5	10	19	
Spitzenkräfte (über 80 % $F_{max}M$)	100			35	≤ 15	8	30		100	
Kräftiges Schlagen					≤ 15	8	30			

Linke Hand	Rechte Hand
3,5	10

Wichtungen der Kraftausübung

Die *Ausführungsbedingungen* erhalten aufgrund einer sicheren Detailerkennbarkeit und guter, kontrollierter Arbeitsumgebungsbedingungen keine Wichtung (0). Die eingenommenen *Körperhaltungen* nehmen für die Tätigkeiten überwiegend einen Wechsel zwischen aufrechtem Stehen und Gehen mit einer leichten Neigung des Oberkörpers zum Handlungsbereich bzw. zur Maschine ein (siehe Abb. 8.18).

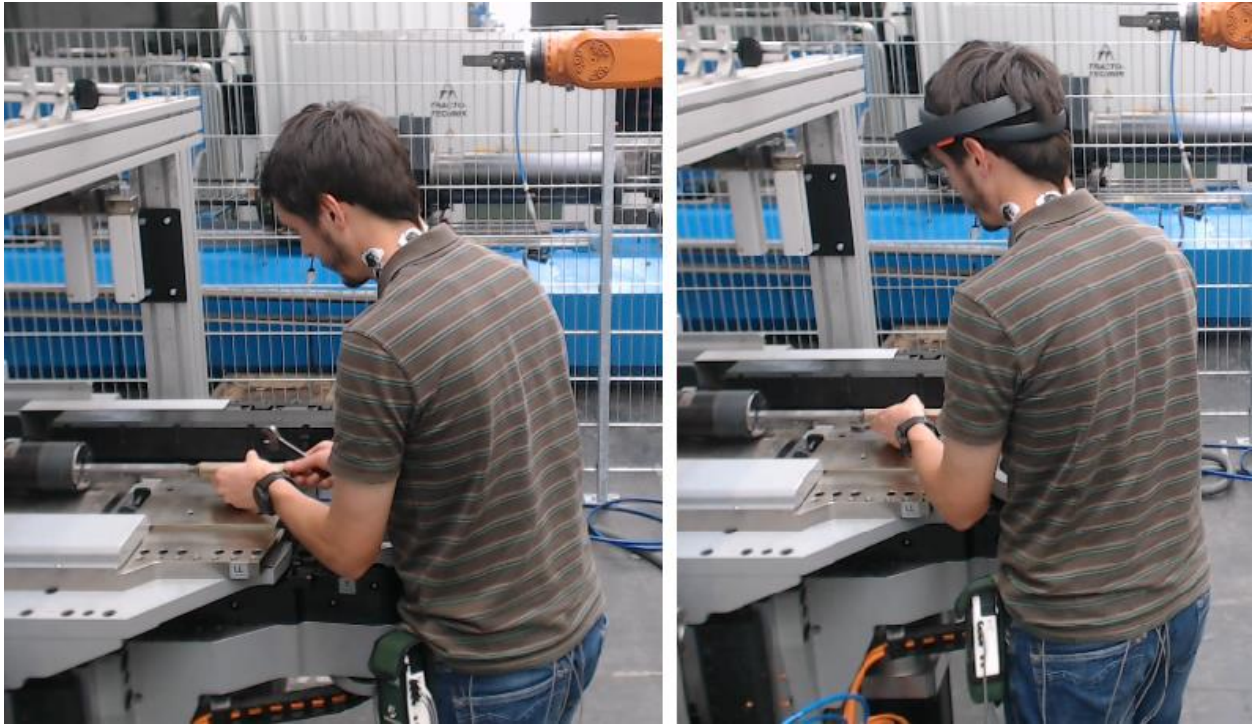


Abb. 8.18: Körperhaltung während des Einschraubens des Biegedorns ohne (links) und mit Nutzung der Datenbrille (rechts)

Im Vergleich der beiden Durchführungsarten zeigt sich zudem, dass das Einsehen der örtlich gebundenen Papierinstruktion eine nach vorn gebeugte Haltung in erhöhter Frequenz provoziert (siehe Abb. 8.19).

Rumpfvordrehungen und Abweichungen von einer aufrechten „neutralen“ Körper- und Kopfhaltung werden im Rahmen der Rüsttätigkeiten ansonsten nur gelegentlich ausgeführt. Das Greifen über Schulterhöhe erfolgt zur Interaktion mit der Datenbrille im Vergleich zur Durchführung mit der Papierinstruktion in leicht erhöhter Frequenz. Weiterhin ist auffällig, dass die Probanden durch das Tragen der Datenbrille Kopfbewegungen verringern, um möglicherweise digitale Details präzise einsehen zu können. Unter Berücksichtigung der auftretenden Haltungsaspekte ergibt sich für das Rüsten ohne HoloLens eine Wichtung von 1,5 und mit HoloLens ein Punktwert von 2.

Im Rahmen des Arbeitsprozesses ist ein Belastungswechsel sehr gering. Zwar sind kurze Rüstzeiten grundsätzlich anzustreben, in diesem Kontext jedoch nicht zwingend erforderlich. Somit

stellt das Arbeitstempo und etwaige Erholzeiten bzw. selbstgewählte Unterbrechungen der Arbeitszeit keinen Flaschenhals dar. Die *arbeitsorganisatorischen Bedingungen* sind somit für die manuellen Rüstvorgänge mit einer Wichtungszahl von 0 zu bewerten.



Abb. 8.19: Körperhaltung während des Einsehens der Rüstinstruktionen ohne (links) und mit Nutzung der Datenbrille (rechts)

Bewertung (Schritt 3)

Die Summe der Wichtungen aus der Art der Kraftausübung, der Kraftübertragung bzw. der Greifbedingungen, der Hand-Armstellung und -bewegung, der Arbeitsorganisation, der Ausführungsbedingung und der Körperhaltung wird mit der jeweiligen Zeitwichtung multipliziert und ergibt die durch die Punktzahl angegebene Bewertungsgrundlage.

Die Interaktion mit der HoloLens bedingt, dass der Rüstvorgang mit dem HMD eine leicht verschlechterte Körperhaltung und Hand-Arm-Stellung aufweist. Beide Punktwerte (Papierinstruktion: 11; HoloLens: 14) liegen unterhalb der 20-Punkte-Grenze der LMM. Sie deuten somit auf ein unwahrscheinliches Arbeitsrisiko durch die Rüsttätigkeiten hin.

8.4.2 *Ergonomic Assessment Worksheet*

Die aus der EAWS-Analyse resultierenden Belastungspunkte leiten, ähnlich zu den Leitmerkmalmethoden, eine gewichtete Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe ab. Der hohe Detaillierungsgrad dieses Ansatzes wird durch die insgesamt fünf Sektionen verdeutlicht, auf die im Folgenden Bezug genommen wird. Die zusammenfassenden Bewertungsbögen sind ebenfalls Anhang E (Abb. E10-E17) zu entnehmen.

Datenbasis und Ergebnis (Sektion 0)

Da im Zuge der empirischen und experimentellen Datenerhebung ausschließlich Männer als potenzielle Maschineneinrichter evaluiert und beobachtet wurden, ist das männliche Geschlecht auch in der Analyse vorherrschend. Die angenommene Zykluszeit beläuft sich für die papierbasierte Rüstvariante auf 18 Minuten (1.080 Sekunden) bzw. 20 Minuten (1.200 Sekunden) für die HoloLens-Anwendung. Das Geschlecht der untersuchten Person wird in Sektion 3 herangezogen, da hier eine Berücksichtigung der Geschlechterunterschiede möglich ist. Die Zykluszeit ist entscheidend für die zeitliche Wichtung der unterschiedlichen Parameter. Der Beobachtungscharakter der Analyse gibt in Sektion 2 das zu verwendende Kraftmaximum vor.

In der Sektion 0 werden zunächst Extrapunkte berechnet, die den gesamten menschlichen Körper betreffen. Da der Maschineneinrichter weder durch bewegende Objekte noch durch Rückschlagkräfte, Impulse oder Schwingungen beeinträchtigt wird, sind für diese Faktoren entsprechend keine „Extrapunkte“ zu vergeben. Weiterhin sind keine weiteren schwerwiegenden körperlichen Belastungen vorherrschend. Einzig wird eine Bewertung der Belastung durch kurzfristige besondere Gelenkstellungen notwendig. Das Handgelenk wird im Zuge des Rüstvorganges in sämtliche Richtungen, d. h. sowohl in dorsale und volare als auch in radiale und ulnare Richtung, ausgelenkt, ohne dabei den maximalen Bewegungsspielraum der Dorsalextension (60°), der Volarflexion (75°) sowie der Radial- (15°) und Ulnarabduktion (30°) zu erreichen (siehe Abb. 8.20). Allerdings treten diese nur vereinzelt, mehrheitlich in neutraler Stellung und als Bruchteil der maximal möglichen Auslenkung auf. Aufgrund dessen kann für den Rüstvorgang eine Intensität von 0,5 angenommen werden. Durchschnittlich werden derartige Gelenkstellungen im Zuge der Montageausführung etwa zweieinhalb Mal pro Minute ausgeführt, wenngleich die Anzahl der Handauslenkungen von der jeweiligen Tätigkeit abhängig ist. Für Schraubtätigkeiten, wie z. B. für das Einschrauben der Dornstange (6x) oder der Montage des Klemmbocks (8x), erfolgen entsprechende Gelenkstellungen mehrfach. Die zeitliche Dauer und Anzahl der tätigkeitsspezifischen Gelenkstellungen können mitsamt der notwendigen Interpolationswerte zur Wichtungsbestimmung der Tabelle 8.2 entnommen werden.

Tab. 8.2: Dauer, Anzahl und interpolierte Wichtungsbestimmung der tätigkeitsspezifischen Handgelenksstellungen ohne (oben) und mit Nutzung der Datenbrille (unten)

Tätigkeit	Papierinstruktion										
	Ifd. Nr.	Zeit [sec]	Gelenkstellung		Wichtung	Interpolation					
			Anzahl	Korrektur		t_x	t_a	t_b	t_y		
Sortieren der Werkzeuge	1	180	6	0,33	0,67	0,33	0	1	0	2	0,67
Einschrauben der Biegedorns	2	120	6	0,33	0,67	0,33	0	1	0	2	0,67
Einstecken des Passfederrings	3	60	1	0,06	0,11	0,06	0	1	0	2	0,11
Einschrauben des Gewindeinsatzes der Biegeachse	4	90	6	0,33	0,67	0,33	0	1	0	2	0,67
Einstecken der Biegeform	5	30	1	0,06	0,11	0,06	0	1	0	2	0,11
Montage der inneren Spannbacke	6	150	8	0,44	0,89	0,44	0	1	0	2	0,89
Einschrauben des Bolzens	7	60	6	0,33	0,67	0,33	0	1	0	2	0,67
Aufstecken des Faltenglätters	8	50	2	0,11	0,22	0,11	0	1	0	2	0,22
Einschrauben des Schiebers	9	180	8	0,44	0,89	0,44	0	1	0	2	0,89
Anlegen der Platte zur Klemmkraftübertragung	10	40	2	0,11	0,22	0,11	0	1	0	2	0,22
Aufsetzen der Platte zur Höhenverstellung auf die Passfeder	11	30	2	0,11	0,22	0,11	0	1	0	2	0,22
Montage des Klemmbocks	12	210	8	0,44	0,89	0,44	0	1	0	2	0,89
Σ		1200	56	3,11	6,22						
HoloLens											
Tätigkeit	Ifd. Nr.	Zeit [sec]	Gelenkstellung		Wichtung	Interpolation					
			Anzahl	Korrektur		t_x	t_a	t_b	t_y		
Sortieren der Werkzeuge	1	180	10	0,5	1,00	0,50	0	1	0	2	1,00
Einschrauben der Biegedorns	2	120	8	0,4	0,80	0,40	0	1	0	2	0,80
Einstecken des Passfederrings	3	60	3	0,15	0,30	0,15	0	1	0	2	0,30
Einschrauben des Gewindeinsatzes der Biegeachse	4	90	8	0,4	0,80	0,40	0	1	0	2	0,80
Einstecken der Biegeform	5	30	3	0,15	0,30	0,15	0	1	0	2	0,30
Montage der inneren Spannbacke	6	150	10	0,5	1,00	0,50	0	1	0	2	1,00
Einschrauben des Bolzens	7	60	8	0,4	0,80	0,40	0	1	0	2	0,80
Aufstecken des Faltenglätters	8	50	4	0,2	0,40	0,20	0	1	0	2	0,40
Einschrauben des Schiebers	9	180	10	0,5	1,00	0,50	0	1	0	2	1,00
Anlegen der Platte zur Klemmkraftübertragung	10	40	4	0,2	0,40	0,20	0	1	0	2	0,40
Aufsetzen der Platte zur Höhenverstellung auf die Passfeder	11	30	4	0,2	0,40	0,20	0	1	0	2	0,40
Montage des Klemmbocks	12	210	10	0,5	1,00	0,50	0	1	0	2	1,00
Σ		1200	82	4,10	8,20						

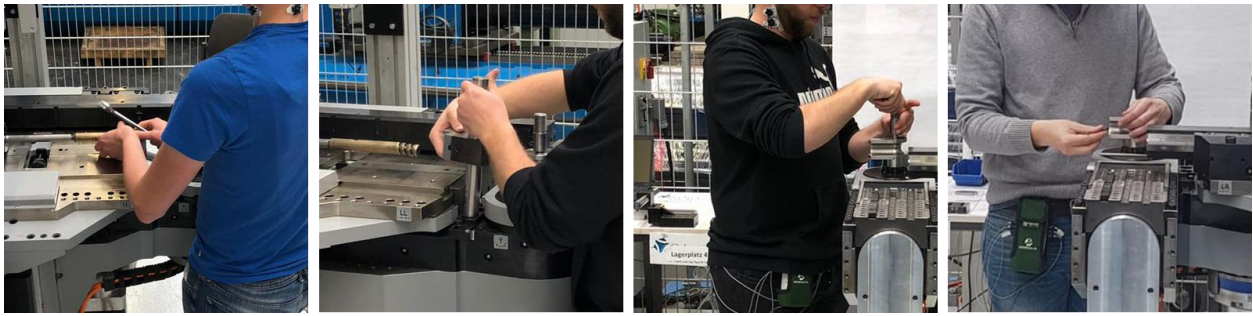


Abb. 8.20: Veranschaulichung der unterschiedlichen Auslenkungen des Handgelenks in vertikaler und horizontaler Ebene am Beispiel der Montage des Biegedorns (links), des Falteglätters (mittig-links) und der inneren Spannbacke

Da während des Rüstvorgangs mit der Datenbrille gerätespezifische Interaktionen erforderlich sind, resultieren durchschnittlich etwa vier Gelenkstellungen pro Minute. Da die Zykluszeit der Prozesse nicht einer standardisierten Arbeitsvorgangszeit von 60 Sekunden entspricht, muss anhand des Korrekturwertes t_x eine Korrektur der einzutragenden Dauer nach Formel 8.1 erfolgen:

$$\text{Korrekturwert } t_x = \frac{\text{Dauer bzw. Anzahl der Körperstellung [sec]}}{\text{Zykluszeit [sec]}} \cdot 60 \frac{\text{sec}}{\text{min}} \quad (8.1)$$

Am Beispiel des Einschraubvorgangs der Dornstange, der etwa 120 Sekunden andauert und insgesamt 6 Gelenkstellungen provoziert, kann im Zuge der papierbasierten Rüstdurchführung eine entsprechende Korrektur exemplarisch aufgezeigt werden:

$$\text{Korrekturwert } t_x = \frac{120 \text{ sec}}{1.080 \text{ sec}} \cdot 60 \frac{\text{sec}}{\text{min}} = 0,33$$

Die kumulierten interpolierten Punktwerte (6,22) ergeben die gesamten Dauer- bzw. Häufigkeitspunkte für die zugehörige Kategorie. Das Produkt der interpolierten Anzahlpunkte (Papierinstruktion: 6,22; HoloLens: 8,2) und der Intensität der Handgelenksstellung (1) weist einen Punktwert von 3,11 bzw. 4,1 für die kurzfristige Gelenkstellung innerhalb der papierbasierten respektive digital gestützten Durchführung aus.

In unmittelbarer Maschinennähe stellen ein Montageroboter und Kabelführungen physische Barrieren und mögliche Kollisions- oder Stolpergefahren dar. Die durch die Nutzung der HoloLens geringfügig eingeschränkte Sicht führt dazu, dass im Vergleich zur Rüstdurchführung mit der papierbasierten Instruktion (0,5 Extrapunkt) ein Extrapunkt vergeben wird. Da Punktwerte innerhalb der EAWS-Analyse stets auf den nächsten halben Wert aufzurunden sind, resultieren Wichtungen für den gesamten Körper von 4 (ohne HMD) bzw. 5,5 Extrapunkten (mit HMD).

Die zeitlichen Berechnungen orientieren sich an den im Rahmen der empirischen Feldstudie beobachteten Realdaten. Zur Berechnung der Nettodauer der repetitiven Tätigkeiten (45 Minuten)

werden von der angenommenen täglichen Schichtdauer (480 Minuten) eine Mittagspause (30 Minuten), weitere offizielle Pausen (25 Minuten) und nicht-repetitive Tätigkeiten (Papierinstruktion: 371 Minuten; HoloLens: 365 Minuten) abgezogen. Diese „ungenutzte“ Arbeitszeit impliziert logistische Tätigkeiten, wie z. B. die Bereitstellung der Halbfertigprodukte, Reinigungs- und Wartungsarbeiten sowie Wartezeiten, die im Zuge der Produktion eines Prüfteils entstehen. Die durchschnittliche Produktionsdauer beträgt ca. 90 Sekunden. In der Regel wird die Zeit zur Herstellung von Referenzerzeugnissen zu einem möglichen Aufbau einer Prüflehre genutzt. In Abhängigkeit der Bauteilkomplexität und der Fähigkeiten der Maschineneinrichter kann die zeitliche Verteilung stark variieren. Die HoloLens-Nutzung bedingt im Vergleich zur Rüstprozessdurchführung ohne Datenbrille (54 Minuten) eine verlängerte Netto-Dauer der repetitiven Tätigkeiten bzw. des dreimaligen täglichen Rüstens (60 Minuten), sodass für nicht-repetitive Tätigkeiten entsprechend geringfügig weniger Zeit aufgewendet werden kann.

Im letzten Abschnitt von Sektion 0 besteht die Möglichkeit, Bemerkungen oder Verbesserungsvorschläge vorzubringen. In diesem Fall muss auf unnötige Fehlbelastungen während der Arbeitsausführung hingewiesen werden, die nachfolgend erörtert werden. Allein diese Beobachtung sollte ein Anlass sein, eine Aufklärung über gesunde Arbeitshaltungen zu intensivieren.

Körperstellung bzw. Rumpf- und Armhaltungen (Sektion 1)

Die Ermittlung der Körperstellung sowie der Rumpf- und Armhaltungen inklusive Lasten bzw. Aktionskräften von 30 bis 40 N erfolgt in Sektion 1. Die Bewertung erfolgt anhand der Zeitdauern für die jeweiligen statischen Rumpf- und Armhaltungen mit der Einstufungsart „Sekunden pro Minute“. Der überwiegend in aufrechter Körperhaltung erfolgende Arbeitsanteil des Rüstvorgangs kann der Kategorie „Stehen und Gehen im Wechsel“ zugeordnet werden, der vornehmlich zwischen der Maschine und der Werkzeugbereitstellung erfolgt. Unabhängig von der Unterstützungsform nimmt dieser Anteil rund 76 % der gesamten Zykluszeit (820 Sekunden) ein. Die restlichen 24 % (260 Sekunden) setzen sich im Rahmen der papierbasierten Anwendung aus etwa um 20 ° bis 40 ° leicht nach vorn geneigten Tätigkeiten zusammen. Letzteres stellt im Zuge der Nutzung der holografischen Anleitung nur einen verminderten Anteil dar (150 Sekunden), der im Zuge der Verschraubungen und bei der (logistischen) Zuordnung der Werkzeuge eingenommen wird. Das Einsehen der virtuellen Instruktionen führt im Vergleich zur Durchführung ohne HMD tatsächlich dazu, dass die Arbeitsabfolgen dynamischer erfolgen. Im Rahmen der Verlagerung der Werkzeuge ist eine Stückliste zu bedienen, die das Vorliegen der intakten Werkzeuge bestätigt. Dementsprechend erhöht sich der Zeitanteil des aufrechten, wechselseitigen Stehens und Gehens auf 1.050 Sekunden. Die papierbasierte und auf einem maschinennahen Tisch platzierte Checkliste

erfordert im Gegensatz zur HMD-Nutzung, dass der Maschineneinrichter eine nach vorn gebeugte Haltung länger als vier Sekunden am Stück einnimmt.

Ähnlich verhält es sich mit zusätzlichen Haltungen, die während des Rüstvorgangs mit der HoloLens auftreten. Um mit der Applikation zu interagieren, hebt der Nutzer den Arm auf Schulter- bzw. Kopfhöhe. Bei insgesamt 12 Arbeitsschritten kann sich die Anzahl der Interaktionen auf insgesamt etwa 30 reale Aktionen belaufen (siehe Sektion 4). Zwar wird der Ellenbogen bis auf das Schulterniveau angehoben, allerdings unterschreitet der Air-tap die zeitliche Referenz von vier Sekunden. Dieser Sachverhalt stellt einen deutlichen Unterschied zur Leitmerkmalmethode dar. Hinsichtlich der Körperhaltung ist allein das Greifen über Schulterhöhe ausschlaggebend. Dies führt wiederum dazu, dass die Softwareinteraktionen in der LMM deutlicher gewichtet werden.

Die einzelnen zu korrigierenden bzw. zu interpolierenden Zeitanteile sich gleichender Haltungen werden addiert. Tabelle 8.3 zeigt die zugehörigen Werte der jeweiligen Körperstellung für die durchweg stehenden Tätigkeiten.

Tab. 8.3: *Zeitanteile und interpolierte Wichtungsbestimmung der im Zuge des Rüstvorgangs eingenommenen Körperstellungen während der Anwendung der Papierinstruktion (oben) und im Zuge der HoloLens-Nutzung (unten)*

Papierinstruktion										
Körperstellung	lfd. Nr.	Zeit [sec]	Korrektur [sec/min]	Wichtung	Interpolation					
					t_x	t_a	t_b	a	b	X
aufrechtes Stehen & Gehen im Wechsel	1	820	45,56	1,78	45,56	40	50	1,5	2	1,78
nach vorn gebeugt (20-60 °)	2	260	14,44	11,03	14,44	12	16	9,5	12	11,03
	Σ	1080	60	12,81						
HoloLens										
Körperstellung	lfd. Nr.	Zeit [sec]	Korrektur [sec/min]	Wichtung	Interpolation					
					t_x	t_a	t_b	a	b	X
aufrechtes Stehen & Gehen im Wechsel	1	1050	52,5	2	52,5	-	-	-	-	-
nach vorn gebeugt (20-60 °)	2	150	7,5	6	7,5	6	9	5	7	6
	Σ	1200	60	8						

Für die erste Haltungskategorie werden folglich 1,78 Punkte (Papierinstruktion) und 2 Punkte (HoloLens) vergeben. Aus der gebeugten Haltung resultiert eine Wichtung von 11,03, die für die HoloLens-Anwendung aufgrund der beschriebenen Ursachen auf 6 Punkte reduziert wird.

Asymmetrische Körperhaltungen, bestehend aus Rumpfdrehung, Rumpfneigung und körperferne Arme bzw. Reichweite, werden ab einer Dauer von vier Sekunden einbezogen. Innerhalb des aufrechten Stehens und Gehens und der moderat nach vorn gebeugten Körperstellung liegen die beschriebenen Haltungen unter den vorgegebenen vier Sekunden und werden somit nicht bewertet. Die Rumpfdrehung sowie die körperferne Reichweite sind vernachlässigbar gering.

Die Zeilensummen der symmetrischen Haltung ergeben einen Punktwert von insgesamt 13 (ohne HoloLens) bzw. 8 (mit HoloLens). Aufgrund der Vernachlässigung asymmetrischer Körperhaltungen entsprechen die Werte der jeweiligen Gesamtpunktzahl.

Aktionskräfte (Sektion 2)

Die Sektion 2 bezieht sich auf die im Arbeitsprozess zu vollziehenden Aktionskräfte. Das Produkt der Ausführungsdauer bzw. -häufigkeit und der Intensität der Tätigkeiten ergibt die Risikowerte für die Aktionskräfte pro Minute. Die Intensität wird als Anteil maximaler Muskelkräfte eingestuft. Die Maximalwerte sind sowohl für Finger- als auch Arm- bzw. Ganzkörperkräfte als geschlechterspezifische Werte angegeben. Sämtliche Aktionskräfte werden in dynamische und statische Kräfte unterteilt. Für dynamische Aktionskräfte wird die Anzahl pro Minute angegeben, während statische Kräfte in Sekunden pro Minute oder als Anteil der Gesamtdauer kategorisiert werden.

Im Rahmen des gesamten Arbeitsprozesses überschreiten lediglich die Schraubvorgänge eine vorgegebene Mindestkraft der Arm- bzw. Ganzkörperkräfte (ohne Lasten) von 40 N. Die Umsetzungsvorgänge und einfachen Steckverbindungen sind entweder als einfache Lastenhandhabung einzuordnen oder ihr Krafteinsatz liegt unterhalb der Grenze von 40 N. Zur Kategorisierung der Arbeitsvorgänge werden untere Grenzwerte definiert, die in Sektion 4 zur Einstufung der Schraubvorgänge genutzt werden. Hand- bzw. Fingerkräfte über 40 N werden im Zuge der Einschraubtätigkeiten im gesamten Arbeitsprozess nicht erreicht, d. h. weder zum Eindrehen der einzelnen Schrauben noch zum Eindrehen des Biegedorns, des Gewindeeinsatzes der Biegeachse und des Bolzens.

Somit beschränken sich die zu bewertenden Kräfte ausschließlich auf Arm-Schulter-Kräfte und werden für die Anzahl einer dynamischen Arm- und Ganzkörperkraft in Anzahl pro Minute angegeben. Für die Schraubvorgänge wurden zum Fest- oder Anziehen der Schrauben gemäß der Festigkeitsklasse 8.8 für zylindrische Edelstahlschrauben (DIN EN ISO 4762, 2004; A2-70, Reibungskoeffizient $\mu_r = 0,14$) Anziehdrehmomente von 11,3 Nm (M6) und 54 Nm (M10) festgelegt. Der Hebel zwischen Schraube und Handballenmitte nimmt für den 5mm-Innensechskantschlüssel, den Schrauben- bzw. Maulschlüssel und den 8mm-Innensechskantschlüssel eine Länge von ca. 20 cm ein, sodass kumulierte Kräfte von 56,5 N (M6; innere Spannbacke) und 270 N (M10; Dornstange, Schieber und Klemmbock) aufgebracht werden müssen. Bis ein Anziehdrehmoment von 11,3 Nm bzw. 54 Nm überhaupt erreicht ist, müssen mehrere Umdrehungen erfolgen. Mit dem für das Fest- oder Anziehen der Schrauben erforderlichen einhändigen Umfassungsgriff, der für jede Schraubverbindung einmalig erfolgt, kann ein männlicher Maschineneinrichter für die Krafrichtung „A-“ maximal 250 N und für die Krafrichtung „B+“ maximal 160 N aufbringen. Die Beobachtung der Arbeitsausführung der Maschineneinrichter und die Kontrolle der erfolgten Schraubverbindungen lässt tatsächlich auf ein verringertes Kraftniveau pro maximalen Anziehvorgang schließen, das auf 70 N festgelegt wurde. Dieser Krafteinsatz entspricht für die jeweiligen

Kraftrichtungen einem Anteil von 28 % („A-“) bzw. 44 % („B+“) der Maximalkraft. Die übrigen Werkzelemente werden handfest angezogen und bedürfen somit keiner spezifischen Betrachtung. Die Armkräfte sind den vier Schraubvorgängen zuzuordnen. Mit der Montage der inneren Spannbacke und dem Einschrauben des Schiebers erfolgen bspw. zwei Kraftrichtungen in aufrechter, stehender Position (siehe Abb. 8.21).

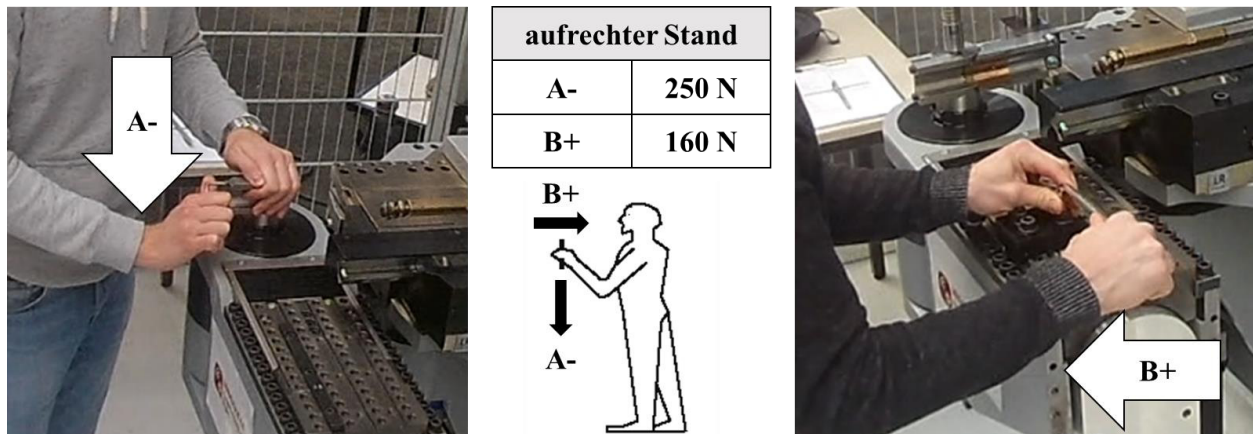


Abb. 8.21: Bestimmung der Maximalkraft gemäß der aus dem Kraftatlas vorgegebenen Kraftrichtung „A-“ (links, Montage der inneren Spannbacke) und „B+“ (rechts, Montage des Schiebers) bei stehend aufrechter Haltung

Die Bestimmung der interpolierten Dauer- bzw. Anzahlwichtungen und die detaillierte Bewertung der Aktionskräfte in Form der interpolierten Kraft- bzw Intensitätswichtungen im Zuge der Schraubvorgänge sind den Tabellen 8.4 und 8.5 zu entnehmen.

Bei einer Intensitätswichtung von 29,55 und einer Ausführungszahl von 0,61 ergibt sich eine Sektionsbewertung von insgesamt 18,5 Punkten für die papierbasierte Variante, während die Rüst-durchführung mithilfe der holografischen Unterstützung aufgrund des differierenden Zeitanteils (Ausführungszahl: 0,55) mit 16,5 Punkten bewertet wird.

Tab. 8.4: Interpolierte Dauer- bzw. Anzahlwichtungen der Schraubtätigkeiten ohne (oben) und mit Nutzung des HMD (unten)

Papierinstruktion									
Tätigkeit	Ifd. Nr.	Anzahl	Korrektur	Wichtung	Interpolation				
					t_x	t_a	t_b	a	b
Einschrauben der Biegedorns	1	1	0,06	0,06	0	1	0	1	0,06
Montage der inneren Spannbacke	2	2	0,11	0,11	0	1	0	1	0,11
Einschrauben des Schiebers	3	4	0,22	0,22	0	1	0	1	0,22
Montage des Klemmbocks	4	4	0,22	0,22	0	1	0	1	0,22
Σ		11	0,61	0,61					
HoloLens									
Tätigkeit	Ifd. Nr.	Anzahl	Korrektur	Wichtung	Interpolation				
					t_x	t_a	t_b	a	b
Einschrauben der Biegedorns	1	1	0,05	0,05	0	1	0	1	0,05
Montage der inneren Spannbacke	2	2	0,10	0,10	0	1	0	1	0,10
Einschrauben des Schiebers	3	4	0,20	0,20	0	1	0	1	0,20
Montage des Klemmbocks	4	4	0,20	0,20	0	1	0	1	0,20
Σ		11	0,55	0,55					

Tab. 8.5: Bestimmung der interpolierten Kraft- bzw. Intensitätswichtungen der Schraubtätigkeiten

Tätigkeit	Ifd. Nr.	Krafrichtung	Körperhaltung	$F_{\text{Anzfehvorgang}}$ [N]	F_{max} [N]	F_i/F_{max} [%]	Korrektur [%]	Wichtung	Interpolation					
									t_x	t_a	t_b	a	b	X
Einschrauben der Dornstange	1	A-	ST aufrecht	70	250	28%	28%	3,14	28%	33,3%	50,0%	6	15	3,14
Montage der inneren Spannbacke	2	A-	ST aufrecht	70	250	28%	28%	3,14	28%	33,3%	50,0%	6	15	3,14
Einschrauben des Schiebers	3	B+	ST aufrecht	70	160	44%	44%	11,63	44%	33,3%	50,0%	6	15	11,6
Montage des Klemmbocks	4	B+	ST aufrecht	70	160	44%	44%	11,63	44%	33,3%	50,0%	6	15	11,6
Σ								29,55						

Manuelles Handhaben von Lasten (Sektion 3)

Sektion 3 analysiert manuelle Handhabvorgänge von Lasten pro Schicht. Die Lastenhandhabungen werden nach Umsetz-, Trage-, Halte- sowie Zieh- und Schiebevorgänge kategorisiert. Umsetzen impliziert ein Anheben und Absetzen der Last für eine Dauer von maximal fünf Sekunden bzw. einen Weg von fünf Metern. Wird diese Zeit respektive Distanz überschritten, werden Halte- oder Tragetätigkeiten ausgeführt. Bewertet werden das Lastgewicht, die Körperhaltung und die Häufigkeit bzw. Haltedauer. Für das Ziehen und Schieben einer Last werden zusätzlich die Ausführungsbedingungen evaluiert, d. h. im Wesentlichen Eigenschaften des Arbeitsplatz-Untergrundes.

Bezugnehmend auf den Rüstprozess werden mit dem Faltenglätter, der Platte zur Höhenverstellung und dem Klemmbock ausschließlich Lasten berücksichtigt, deren Gewicht 1,5 kg übersteigt. Dabei treten vornehmlich Umsetzvorgänge auf, die einhändig erfolgen. Gemäß der EAWS-Vorschrift sind einhändige Lastwirkungen mit dem Faktor 1,7 zu multiplizieren und auf die vorgegebene minimale Lastreferenz von 3 kg zu beziehen. Sofern diese Vorgänge länger als fünf Sekunden andauern, werden sie der Kategorie „Halten“ zugeordnet. Sämtliche Werkzeuge werden im Zuge des Rüstvorgangs zweimal umgesetzt. Zunächst aus der Werkzeugkiste auf das Shadowboard und von dem Shadowboard zur Maschine. Da bei diesen Tätigkeiten unterschiedliche Körperhaltungen eingenommen werden, die durch eine aufrechte Haltung des Oberkörpers, eine z. T. geringfügig verdrehte Rumpfdrehung und -neigung sowie einer körpernahen Lastenhandhabung gekennzeichnet sind, werden für beide Durchführungsarten 1,5 Haltungspunkte vergeben.

Die Einzelergebnisse des Rüstprozesses ohne Datenbrille, die sich ausschließlich aus Umsetzvorgängen der beschriebenen Werkzeuge zusammensetzen, sind in der Tabelle 8.6 dargestellt.

Tab. 8.6: *Wichtungsbestimmung der Lastgewichte (> 1,5 kg) im Rahmen der rüstspezifischen Umsetzvorgänge*

Lastgewichte	lfd. Nr.	Gewicht [kg]	Korrektur [kg]	Wichtung	Interpolation					
					t_x	t_a	t_b	a	b	X
Faltenglätter	1	3,5	5,95	1,21	5,95	3	10	1	1,5	1,21
Platte zur Höhenverstellung	2	1,6	2,72	0,91	2,72	0	3	0	1	0,91
Klemmbock	3	3,3	5,61	1,19	5,61	3	10	1	1,5	1,19
	Σ	8,4	14,28	3,30						

Das Gesamtergebnis der Sektion 3 für die Rüstprozessdurchführung unter Zuhilfenahme der Papierinstruktion ergibt sich schließlich aus der Summe der interpolierten Werte des Umsetzens (3,30) mit den lastspezifischen Haltungsbedingungen (1,5), die mit der Häufigkeit der Umsetzvorgänge (1,05) multipliziert wird. Bei insgesamt sechs Umsetzvorgängen ($t_x = 6$), wird die Häufigkeitswichtung wie folgt berechnet:

$$X = 1 + \left(\frac{2-1}{25-5}\right) \cdot (6 - 5) = 1,05$$

Das Sektionsergebnis beläuft sich somit gerundet auf 5,5 Punkte.

Da sich durch die Nutzung der HoloLens hinsichtlich der Kategorie „Umsetzen“ keine tätigkeitsbezogenen Unterschiede ergeben, sind die entsprechenden Punktwerte identisch zum Rüsten ohne Unterstützungssystem. Ein in Sektion 3 relevanter Unterschied der Durchführungsarten ist das durch die Nutzung der HoloLens begründete etwa 10 Sekunden andauernde Halten von Werkzeugen, sodass die zugehörige Kategorie in die Analyse einbezogen werden muss (siehe Tab. 8.8). Die Berechnung der interpolierten Haltedauer ist nachfolgend aufgeführt:

$$X = 1 + \left(\frac{2-1}{10-2,5}\right) \cdot (5 - 2,5) = 1,33$$

In diesem Zusammenhang ist außerdem zu erwähnen, dass die dabei eingenommene Körperhaltung durch die ausschließlich aufrechte Körperhaltung und direkte Lasthandhabung am Körper einem Punktwert von 1 entspricht. Somit setzt sich das Gesamtergebnis aus den beiden Teilwerten (Umsetzvorgänge: 5,04; Haltevorgänge: 5,74) zu insgesamt 11 Punkten zusammen.

Belastung der oberen Extremitäten durch repetitive Tätigkeiten (Sektion 4)

Der Rüstprozess teilt sich in statische und dynamische Arbeitsanteile auf. Im Zuge der Nutzung der Papierinstruktion werden in Bezug auf die gesamte Zykluszeit von 1.080 Sekunden 64,81 % (HoloLens: 63,33 %) statische Aktionen und entsprechend 35,19 % (HoloLens: 36,67 %) dynamische Aktionen durchgeführt. Zu Beginn der Sektion 4 wird im Rahmen der Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten zunächst die Frequenz der statischen und dynamischen Teiltätigkeiten unter Berücksichtigung des eingesetzten Kraftlevels, der Kraft-Dauer bzw. Kraft-Häufigkeit, der Ausführungsform der Aktionen oder der vorliegenden Greifbedingungen (Griffpunkte für statische respektive dynamische Aktionen) und des jeweiligen prozentualen Anteils der statischen bzw. dynamischen Aktionen im Kraftniveau ermittelt. Das Produkt des Letzteren mit der tätigkeitsspezifischen Summe der statischen oder dynamischen Aktionen ergibt den jeweiligen statischen und dynamischen Anteil. Die modifizierten Griffpunkte für statische Aktionen errechnen sich aus dem Produkt der Griffbedingungspunkte mit dem prozentualen Anteil der statischen Aktionen.

Auf Grundlage der Gesamtfrequenz der normierten statischen ($f_{statisch}$) und dynamischen Aktionen ($f_{dynamisch}$) werden die Punkte für die jeweils zugehörigen Aktionen bestimmt. Am Beispiel der papierbasierten Durchführung wird deren rechnerische Ermittlung durch Formel 8.2 und 8.3 nachfolgend aufgeführt.

$$f_{statisch} = \frac{\sum t_{statische\ Aktionen}}{t_{zyklus}} \cdot 60\ sec \quad (8.2)$$

$$f_{statisch} = \frac{700\ sec}{1.080\ sec} \cdot 60\ sec = 38,89\ sec$$

$$f_{dynamisch} = \frac{\sum n_{dynamische\ reale\ Aktionen}}{t_{zyklus} - \sum t_{statische\ reale\ Aktionen}} \cdot 60\ sec \quad (8.3)$$

$$f_{dynamisch} = \frac{141\ reale\ Aktionen}{(1.080 - 700)\ sec} \cdot 60\ sec = 22,26\ reale\ Aktionen$$

Tabelle 8.7 (Papierinstruktion) und Tabelle 8.8 (HoloLens) sind zunächst die interpolierten Daten zur Bestimmung der statischen und dynamischen Aktionspunkte zu entnehmen. Die kategorisierten statischen und dynamischen Tätigkeiten sind in Tabelle 8.9 (Papierinstruktion) und Tabelle 8.10 (HoloLens-Anwendung) dargestellt.

Der durchgeführte Rüstvorgang weist vornehmlich dynamische Tätigkeiten auf, die sich aus Gehen oder Laufen mitsamt der Lastenhandhabung (50 reale Aktionen), der Werkzeugsortierung (11 reale Aktionen), Auflage- bzw. Stecktätigkeiten (11 reale Aktionen), dem handfesten (35 reale Aktionen) sowie maximalen Anziehen von Schraubverbindungen (22 reale Aktionen) zusammensetzen. Während der Nutzung der Datenbrille steigen vereinzelt die Haltedauern der Werkzeugelemente, die jedoch nur von kurzer Dauer sind und für diese Sektion somit keinen Einfluss auf die Bewertung nehmen. Die Interaktion mit der Rüstapplikation (30 reale Aktionen) sind im Vergleich zur papierbasierten Anwendung (12 reale Aktionen) außerdem um einen Faktor von 2,5 deutlich höher. Statische Tätigkeiten beschränken sich mit einer Dauer von rund 700 Sekunden (Papierinstruktion) respektive 760 Sekunden (HoloLens) auf die stehend ausgeführten Handlungen und das Einsehen der Rüstinstruktionen. Griffpunkte sind einzig für das handfeste Anziehen von Schraubverbindungen zu vergeben, da die moderate Fingerzufassung für ein Kraftlevel zwischen 20 und 35 N eine Wichtungszahl von 2 impliziert. Die übrigen Tätigkeiten erfolgen entweder als Umfassungs- bzw. Kontaktgriff (Festziehen der Schraubverbindungen) oder als Kombination dieser Griffarten und werden somit nicht gewichtet. Die Punktwerte der statischen bzw. dynamischen Anteile errechnen sich aus der Summe der einzelnen interpolierten und kumulierten dynamischen Aktionen sowie den zugehörigen Griffpunkten, die mit dem Prozentsatz der Aktionen im jeweiligen Kraftniveau multipliziert wird.

Tab. 8.7: Wichtungen der statischen und dynamischen Teiltätigkeiten im Zuge der Rüstdurchführung mithilfe der papierbasierten Instruktion

Statische Aktionen											
Tätigkeit	Ifd. Nr.	Dauer [sec]	Kraft [N]	Korrektur [sec/min]	Wichtung	Interpolation					
						t _x	t _a	t _b	a	b	X
Stehen und Einsehen der Instruktion	1	700	0-5	38,89	1	38,89	30	45	1	1	1
	Σ	700			1						
Dynamische Aktionen											
Tätigkeit	Ifd. Nr.	Reale Aktionen	Kraft [N]	Korrektur [reale Aktionen/min]	Wichtung	Interpolation					
						t _x	t _a	t _b	a	b	X
Interaktion mit Papierinstruktion	1	12	0-5	22,26	1,45	22,26	20	25	1	2	1,45
Gehen bzw. Laufen inkl. Lastenhandhabung	2	50	0-5	22,26	1,45	22,26	20	25	1	2	1,45
Werkzeugsortierung	3	11	> 5 - 20	22,26	2,45	22,26	20	25	2	3	2,45
Auflage- bzw. Steckfähigkeiten	4	11	> 5 - 20	22,26	2,45	22,26	20	25	2	3	2,45
Handfestes Anziehen von Schraubverbindungen	5	35	> 20 - 35	22,26	3,45	22,26	20	25	3	4	3,45
Festziehen bzw. max. Anziehen von Schraubverbindungen	6	22	> 35 - 90	22,26	5,91	22,26	20	25	5	7	5,91
	Σ	141			17,17						

Tab. 8.8: Wichtungen der statischen und dynamischen Teiltätigkeiten im Zuge der Rüstdurchführung mithilfe der holografischen Instruktion

Statische Aktionen											
Tätigkeit	Ifd. Nr.	Dauer [sec]	Kraft [N]	Korrektur [sec/min]	Wichtung	Interpolation					
						t _x	t _a	t _b	a	b	X
Stehen und Einsehen der Instruktion	1	760	0-5	38	1	38	30	45	1	1	1
	Σ	760			1						
Dynamische Aktionen											
Tätigkeit	Ifd. Nr.	Reale Aktionen	Kraft [N]	Korrektur [reale Aktionen/min]	Wichtung	Interpolation					
						t _x	t _a	t _b	a	b	X
HoloLens-Interaktion	1	30	0-5	21,68	1,34	21,68	20	25	1	2	1,34
Gehen bzw. Laufen inkl. Lastenhandhabung	2	50	0-5	21,68	1,34	21,68	20	25	1	2	1,34
Werkzeugsortierung	3	11	> 5 - 20	21,68	2,34	21,68	20	25	2	3	2,34
Auflage- bzw. Steckfähigkeiten	4	11	> 5 - 20	21,68	2,34	21,68	20	25	2	3	2,34
Handfestes Anziehen von Schraubverbindungen	5	35	> 20 - 35	21,68	3,34	21,68	20	25	3	4	3,34
Festziehen bzw. max. Anziehen von Schraubverbindungen	6	22	> 35 - 90	21,68	4,67	21,68	20	25	4	6	4,67
	Σ	159			15,35						

Tab. 8.9: Darstellung der Einzelergebnisse in der Sektion 4 des EAWS zum Rüstprozess ohne Datenbrille

Statische Aktionen									
Tätigkeit	Idl. Nr.	Dauer [sec]	Kraft [N]	Statische Aktionen [sec/min]	Greifbedingungen	Statische Aktionen [%]	Statischer Anteil		
Stehen und Einsehen der Instruktion	1	700	0-5	1	abc	58,33 %	0,58		
	Σ	700					0,58		
Dynamische Aktionen									
Tätigkeit	Idl. Nr.	Reale Aktionen	Kraft [N]	Dynamische Aktionen [reale Aktionen/min]	Greifbedingungen	Dynamische Aktionen [%]	Dynamischer Anteil		
Interaktion mit Papierinstruktion	1	12	0-5	1,45	abc	2,99 %	0,04		
Gehen bzw. Laufen inkl. Lastenhandhabung	2	50	0-5	1,45	abc	12,48 %	0,18		
Werkzeugsortierung	3	11	> 5 - 20	2,45	ab	2,74 %	0,07		
Auflage- bzw. Steckfähigkeiten	4	11	> 5 - 20	2,45	ab	2,74 %	0,07		
Handfestes Anziehen von Schraubverbindungen	5	35	> 20 - 35	3,45	b	8,73 %	0,48		
Festziehen bzw. max. Anziehen von Schraubverbindungen	6	22	> 35 - 90	5,91	a	5,49 %	0,32		
	Σ	141					1,12		

Tab. 8.10: Darstellung der Einzelergebnisse in der Sektion 4 des EAWS zum Rüstprozess mit Datenbrille

Statische Aktionen									
Tätigkeit	Idl. Nr.	Dauer [sec]	Kraft [N]	Statische Aktionen [sec/min]	Greifbedingungen	Statische Aktionen [%]	Statischer Anteil		
Stehen und Einsehen der Instruktion	1	760	0-5	1	abc	63,33 %	0,63		
	Σ	760					0,63		
Dynamische Aktionen									
Tätigkeit	Idl. Nr.	Reale Aktionen	Kraft [N]	Dynamische Aktionen [reale Aktionen/min]	Greifbedingungen	Dynamische Aktionen [%]	Dynamischer Anteil		
HoloLens-Interaktion	1	30	0-5	1,34	abc	6,92 %	0,09		
Gehen bzw. Laufen inkl. Lastenhandhabung	2	50	0-5	1,34	abc	11,53 %	0,15		
Werkzeugsortierung	3	11	> 5 - 20	2,34	ab	2,54 %	0,06		
Auflage- bzw. Steckfähigkeiten	4	11	> 5 - 20	2,34	ab	2,54 %	0,06		
Handfestes Anziehen von Schraubverbindungen	5	35	> 20 - 35	3,34	b	8,07 %	0,43		
Festziehen bzw. max. Anziehen von Schraubverbindungen	6	22	> 35 - 90	4,67	a	5,07 %	0,24		
	Σ	159					0,94		

Zeitanteile ungünstiger Haltungen des Handgelenks, des Ellenbogens und der Schulter sind in Bezug auf den „klassischen“ Arbeitsfall vernachlässigbar gering. Einzig die HMD-Nutzung bedingt durch das Anheben des Oberarms eine ungünstigste Haltung über Schulterhöhe, die allerdings dynamischer Natur ist. Insgesamt werden sowohl eine Radial- und Ulnarabduktion der Hände von 15 ° bzw. 20 ° als auch eine Dorsalextension und eine Volarflexion von jeweils 45 ° unterschritten. Somit werden entsprechend keine Haltungspunkte vergeben.

Zusatzfaktoren, wie z. B. das Arbeiten mit vibrierenden Werkzeugen oder durch Arbeitsbewegung entstehende Rückschläge, sind nicht existent. Die Dauer der repetitiven Tätigkeit umfasst abschließend den Zeitanteil in Bezug auf die gesamte Schichtdauer. Da beide Rüstdurchführungen eine einstündige Schicht nicht überschreiten, wird gleichermaßen ein Zeitanteilsfaktor vergeben. Die Bewertung der Arbeitsorganisation kann ebenfalls in der niedrigsten Kategorie eingestuft werden, da Unterbrechungen der Tätigkeit i. d. R. aufgrund der langen Zykluszeit von mehr als 10 Minuten jederzeit möglich sind. Im Anschluss werden zwei Pausen (Mittagspause und andere offizielle Pausen) über acht Minuten bewertet, sodass in Relation zur hohen Zykluszeit (> 30 Sekunden) 0,5 Punkte abgezogen werden.

Auf Grundlage der Einzelwertungen, d. h. des Kraft-Häufigkeit-Griff-Verhältnisses, der Haltungspunkte und der zeitlichen Bewertung, wird für beide Unterstützungsarten eine Gefährdung der oberen Extremitäten mit einem aufgerundeten Punktwert von 1 beschrieben.

Gesamtbewertung

Aus der Betrachtung der kumulierten Punktwerte für den „Gesamtkörper“ eines Maschinenrichters im Zuge eines Rüstprozesses einer Rotationszugbiegemaschine, bestehend aus Haltungs-, Kräfte- und Lastenhandhabungswichtungen sowie spezifischen Extrapunkten, geht unter Berücksichtigung der oberen Extremitäten hervor, dass Maßnahmen hinsichtlich der Um- bzw. Neugestaltung des Arbeitsprozesses nicht zwingend erforderlich, aber zu empfehlen sind. Während für die Bewertung der Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten lediglich je ein Punkt vergeben wurde, beläuft sich die Punktzahl des Gesamtkörpers auf 41 Punkte. Somit besteht gemäß der 3-Zonen-Bewertung in Form des Ampelschemas für die Arbeitsperson das potenzielle Risiko einer berufsbedingten Erkrankung oder Verletzung des gesamten Körpers während der Durchführung eines Rüstprozesses sowohl unter Zuhilfenahme einer Papierinstruktion als auch durch die Nutzung einer Datenbrille. Es ist mittel- bis langfristig nicht annehmbar, die Mitarbeiter diesem Risiko auszusetzen. Maßnahmen zur Prozessoptimierung in Form einer Risikominimierung sind demnach zu ergreifen. Entscheidend für eine risikoärmere

Durchführung des Rüstprozesses mithilfe der HoloLens ist durch die Haltungsbewertung begründet, die aufgrund der interaktionsbedingten verbesserten Gesamtkörperhaltung resultiert. Den größten Risikofaktor nehmen die Aktionskräfte ein.

8.5 Teilstudie 1 („HoloErgo“) - Evaluierung von physischen und psychischen Beanspruchungsindikatoren bei der Anwendung eines AR-basierten Head-Mounted Displays im Rahmen einfacher Montagetätigkeiten und statischer Blickpositionierungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse des zuvor beschriebenen Versuchsdesigns der ersten Teilstudie durch einen Vergleich der Versuchsdurchführung mit HoloLens (*HL*) und ohne HoloLens respektive mithilfe einer Papier-Instruktion (*PI*) detailliert dargestellt. Zunächst wird auf die muskelphysiologischen bzw. elektromyographisch festgehaltenen Messwerte der links- (*li*) und rechtsseitigen (*re*) Stellen des m. sternocleidomastoideus (*sterno*) und die beidseitigen oberen (*o*) und unteren (*u*) Bereiche des m. trapezius pars descendens (*trap*) aus der Versuchsreihe zu statischen Blickpositionierungen im Zuge einer sprach- (*BlickS*) und gestengesteuerten (*BlickG*) Interaktion eingegangen, wobei aufgrund der für die entsprechenden Schlussfolgerungen bestehenden Relevanz die darin enthaltene Beschreibung der Positionen mit starker seitlicher Kopfbewegung eine besondere Beachtung erfährt. Im Anschluss daran wird auf eine analoge Ergebnisbeschreibung des Versuchsdurchlaufs zur Montagetätigkeit (*Mont*) zurückgegriffen. Die Beschreibung der objektiven Daten wird durch am Kopfbereich erfasste thermoregulatorische Werte ergänzt. Das subjektive Beanspruchungserleben, das sich sowohl aus physischen als auch psychischen Komponenten zusammensetzt, wurde durch mehrere standardisierte Fragebögen und eine Kombination aus offenen und geschlossenen Fragen erfragt. Auf eine Leistungsbewertung der Probanden wurde in dieser Teilstudie verzichtet, da durch die Konzeption des Versuchssettings zum einen keine signifikanten Zeitunterschiede zu erwarten waren. Zum anderen sollte der wissenschaftliche Fokus entsprechend ausschließlich auf die Evaluierung der durch die Nutzung eines AR-unterstützten HMD hervorgerufenen physischen und psychischen Beanspruchung ausgerichtet werden.

8.5.1 Objektive Beanspruchung

Zur Objektivierung der physischen Beanspruchung in Folge der Nutzung eines HMD wurden die Muskelaktivitäten im Schulter-Nacken-Bereich und thermografische Veränderungen der Hautoberflächentemperatur im Kopfbereich erfasst.

8.5.1.1 *Elektromyographische Aktivitäten der Schulter-Nacken-Muskulatur*

Zunächst deutet der Shapiro-Wilk-Test darauf hin, dass sämtliche Daten normalverteilt sind und der t-Test für abhängige bzw. verbundene Stichproben eingesetzt werden kann. Dies kann exemplarisch am Beispiel der Datenreihen zu den Muskelaktivitäten des oberen rechtsseitigen m. trapezius pars descendens dargelegt werden: $SW_{Mont, PI} = 0,894$, $p_{Mont, PI} = 0,135$; $SW_{Mont, HL} = 0,899$, $p_{Mont, HL} = 0,154$; $SW_{BlickS, PI} = 0,954$, $p_{BlickS, PI} = 0,693$; $SW_{BlickS, HL} = 0,941$, $p_{BlickS, HL} = 0,517$; $SW_{BlickG, PI} = 0,909$, $p_{BlickG, PI} = 0,209$; $SW_{BlickG, HL} = 0,937$, $p_{BlickG, HL} = 0,457$.

Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass die elektromyographischen Aktivitäten der Schulter-Nacken-Muskulatur für die jeweilige Durchführung mit und ohne HoloLens sowohl im Zuge einfacher Montagetätigkeiten als auch bei statischen Blickpositionierungen im Hinblick auf verschiedene Blickrichtungen ein vergleichbares Wertenniveau annehmen.

Die Darstellung der standardisierten elektromyographischen Aktivität erfolgte kategorisiert in Bezug auf schwere bzw. starke (90°), mittlere (50° bis 65°) und leichte (0° bis 45°) seitliche Kopfbewegungen. Sämtliche Messergebnisse beziehen sich dabei – mit Ausnahme der Montagetätigkeit – auf eine rein statische Betrachtung der jeweiligen Blickwinkel. In sämtlichen Versuchsdurchläufen werden bei Nutzung der HoloLens der m. sternocleidomastoideus sowie der untere und obere Teil des m. trapezius pars descendens im Vergleich zur Versuchsdurchführung ohne Datenbrille beidseitig stärker aktiviert. Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich die für die jeweiligen Muskelgruppen exemplarisch angegebenen Werte auf die Maximalaktivität des links- oder rechtsseitigen Muskels.

Statische Blickpositionierungen

Für die Beurteilung der durch die Verwendung der HoloLens hervorgerufene Mehrbeanspruchung zeichnet sich folgendes Muster ab: Je stärker die Blickpositionen bzw. der Kopf seitlich ausgerichtet werden, desto höher werden einzelne Muskeln oder Muskelstellen aktiviert, wie insbesondere die sich jeweils entgegen der Blickrichtung befindlichen m. sternocleidomastoidei (siehe Abb. 8.22-8.23).

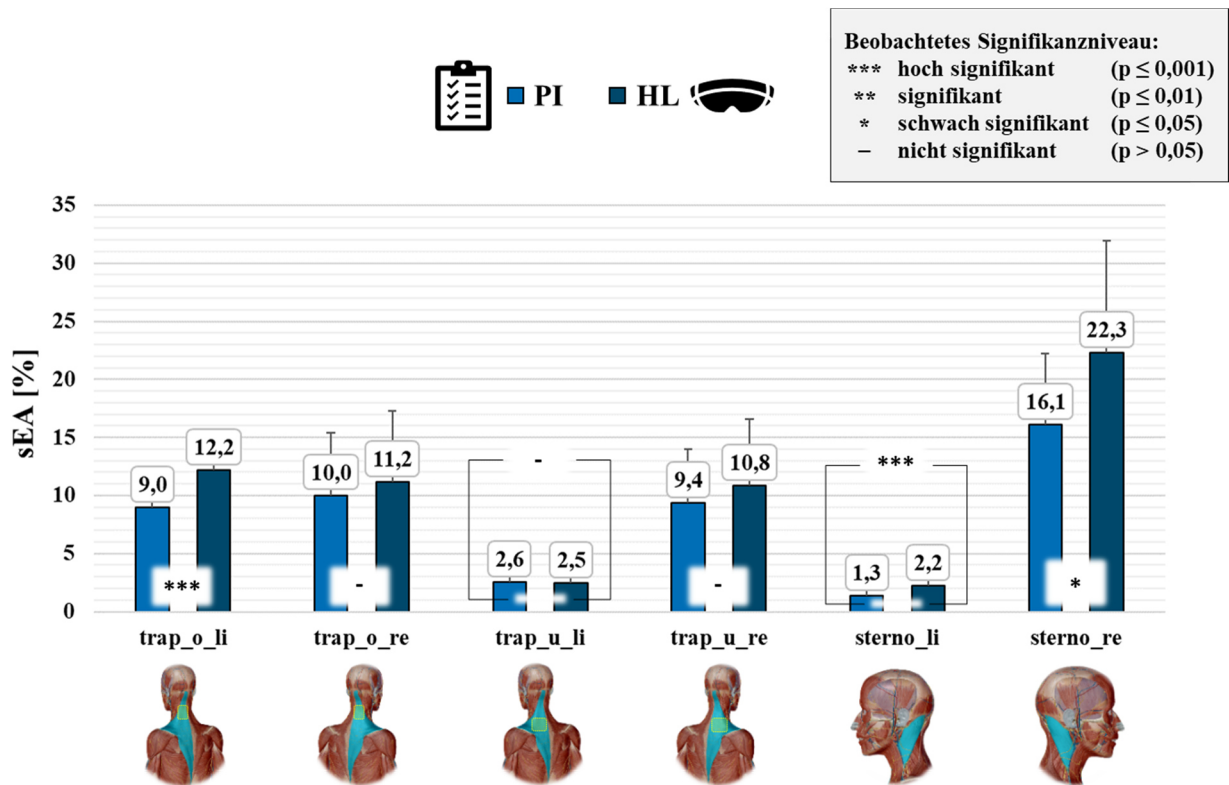


Abb. 8.22: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während starker linksseitiger Blickrichtungen

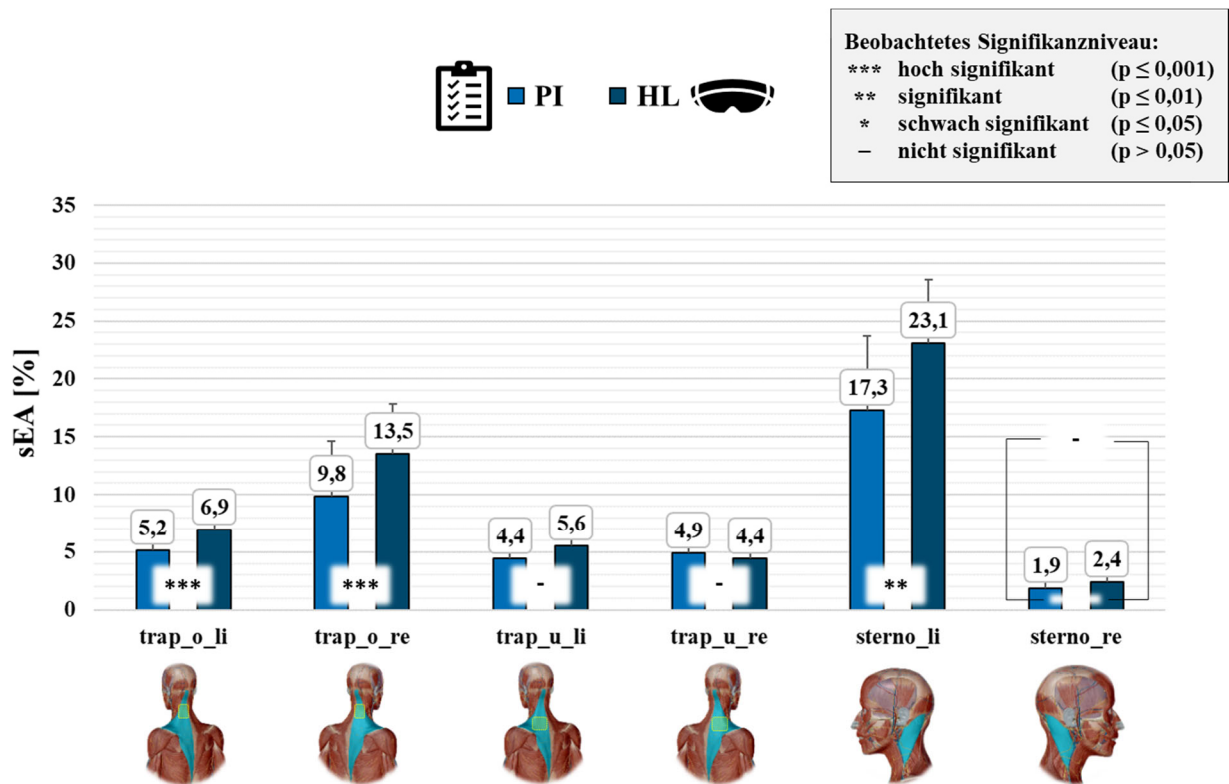


Abb. 8.23: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während starker rechtsseitiger Blickrichtungen

Die in Blickrichtung liegenden links- ($M_{PI} = 1,3 \pm 0,5 \%$, $M_{HL} = 2,2 \pm 0,9 \%$, $t = -5,830$, $p < 0,001$, $d = 1,683$) und rechtsseitigen m. sternocleidomastoidei ($M_{PI} = 1,9 \pm 2,3 \%$, $M_{HL} = 2,4 \pm 1,5 \%$, $t = -1,350$, $p = 0,204$, $d = 0,390$) weisen bei schweren seitlichen Kopfbewegungen hingegen nur sehr geringe und mit den unteren Stellen des m. trapezius pars descendens (linksseitig: $M_{PI} = 2,6 \pm 1,9 \%$, $M_{HL} = 2,5 \pm 1,4 \%$, $t = 0,336$, $p = 0,743$, $d = 0,097$; rechtsseitig: $M_{PI} = 4,9 \pm 2,0 \%$, $M_{HL} = 4,4 \pm 1,6 \%$, $t = 1,675$, $p = 0,122$, $d = 0,483$) innerhalb der schweren Blickpositionierungen die niedrigsten muskulären Aktivitäten auf. Die jeweils zur Blickrichtung entgegengesetzten lateralen Halsmuskeln erreichen während der Nutzung der HoloLens eine signifikante und effektstarke Aktivierung von $22,3 \pm 9,6 \%$ (rechte Seite: $M_{PI} = 16,1 \pm 6,1 \%$, $t = -3,054$, $p = 0,011$, $d = 0,882$) bzw. $23,1 \pm 5,5 \%$ (linke Seite: $M_{PI} = 17,3 \pm 6,5 \%$, $t = -4,148$, $p = 0,002$, $d = 1,197$).

Deutlich schwächer, aber dennoch erwähnenswert, wird der jeweils entgegen der Blickrichtung liegende obere rechtsseitige ($M_{PI} = 10,0 \pm 5,4 \%$, $M_{HL} = 11,2 \pm 6,1 \%$, $t = -1,801$, $p = 0,099$, $d = 0,520$) und untere Teil des Trapez-Muskels ($M_{PI} = 9,4 \pm 4,6 \%$, $M_{HL} = 10,8 \pm 5,8 \%$, $t = -1,964$, $p = 0,075$, $d = 1,168$) beansprucht. Bei tiefer liegender Blickposition erhöht sich auf der in Blickrichtung gelegenen Seite tendenziell die muskuläre Aktivierung durch den Einsatz der HoloLens. Der obere Teil des m. trapezius pars descendens ($M_{HL} = 13,5 \pm 4,3 \%$) zeigt dabei im Gegensatz zum unteren Teil ($M_{HL} = 4,4 \pm 1,6 \%$) eine hoch signifikant größere und effektstärkere Aktivierung ($t = 7,838$, $p < 0,001$, $d = 2,263$). Der Einsatz der HoloLens bewirkt hinsichtlich starker seitlicher Kopfauslenkungen bis auf eine einzige Ausnahme (rechtsseitiger unterer Trapezmuskel: $M_{PI} = 4,9 \pm 2,0 \%$, $M_{HL} = 4,4 \pm 1,6 \%$, $t = 1,675$, $p = 0,122$, $d = 0,483$) für sämtliche beobachteten Muskel bzw. Muskelteile einen erhöhten muskulären Aufwand.

Die bei schweren seitlichen Kopfbewegungen feststellbaren Unterschiede zwischen der Nutzung der HoloLens und der Durchführung ohne Datenbrille konnten bei leichten bis mittelschweren Blickpositionen ohne deutliche seitliche Auslenkungen nur bedingt festgestellt werden (siehe Abb. 8.24-8.25). Mit einer verminderten horizontalen Kopfauslenkung geht eine Abnahme der Aktivitätsdifferenz einher. Am Beispiel des linksseitigen m. sternocleidomastoideus wird deutlich, dass der Messwertunterschied bei einem eingenommenen Blickwinkel von 0° bis 45° ($M_{PI} = 2,8 \pm 0,8 \%$, $M_{HL} = 3,5 \pm 1,1 \%$, $t = 1,675$, $p = 0,122$, $d = 0,483$) im Vergleich zu horizontalen Blickrichtungen von 50° bis 65° ($M_{PI} = 2,8 \pm 1,1 \%$, $M_{HL} = 4,0 \pm 1,1 \%$, $t = -4,501$, $p < 0,001$, $d = 1,299$) geringer ausfällt. Eine substantielle zusätzliche Beanspruchung durch den Einsatz des HMDs ist demnach nicht zu erwarten.

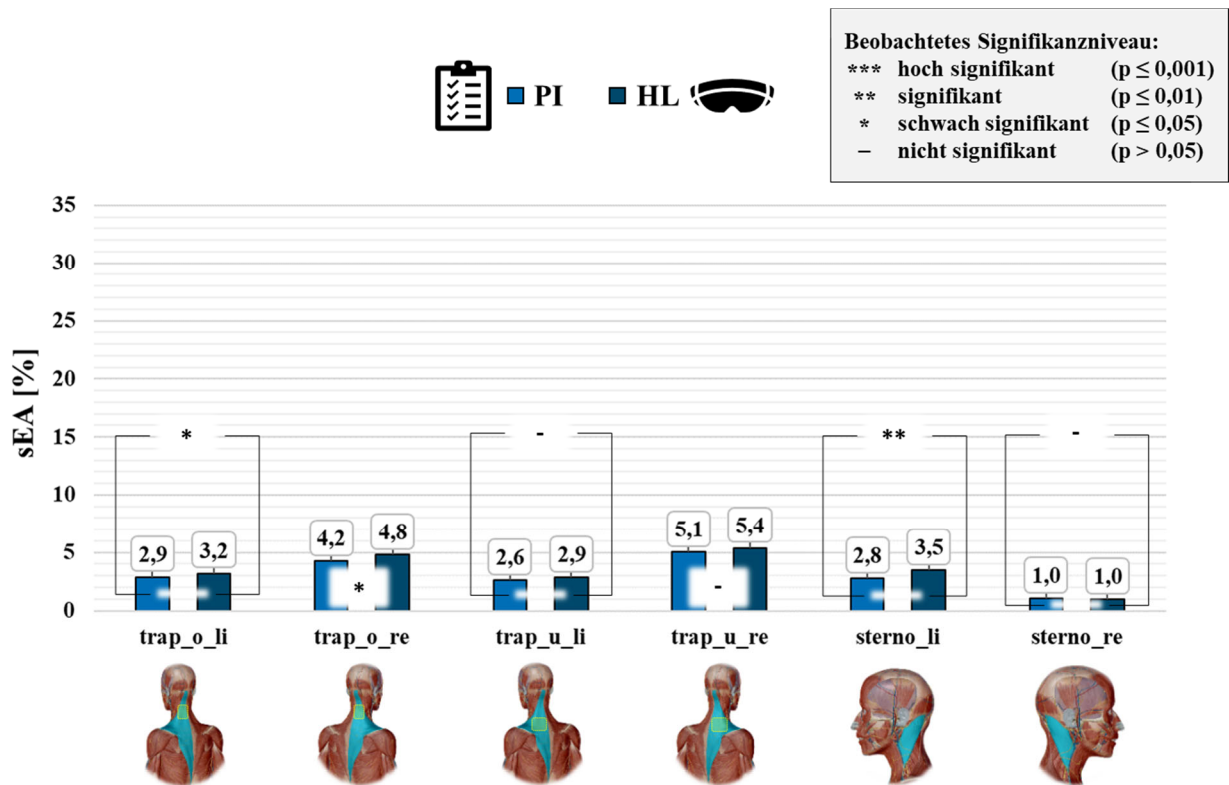


Abb. 8.24: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während leichter Blickpositionen

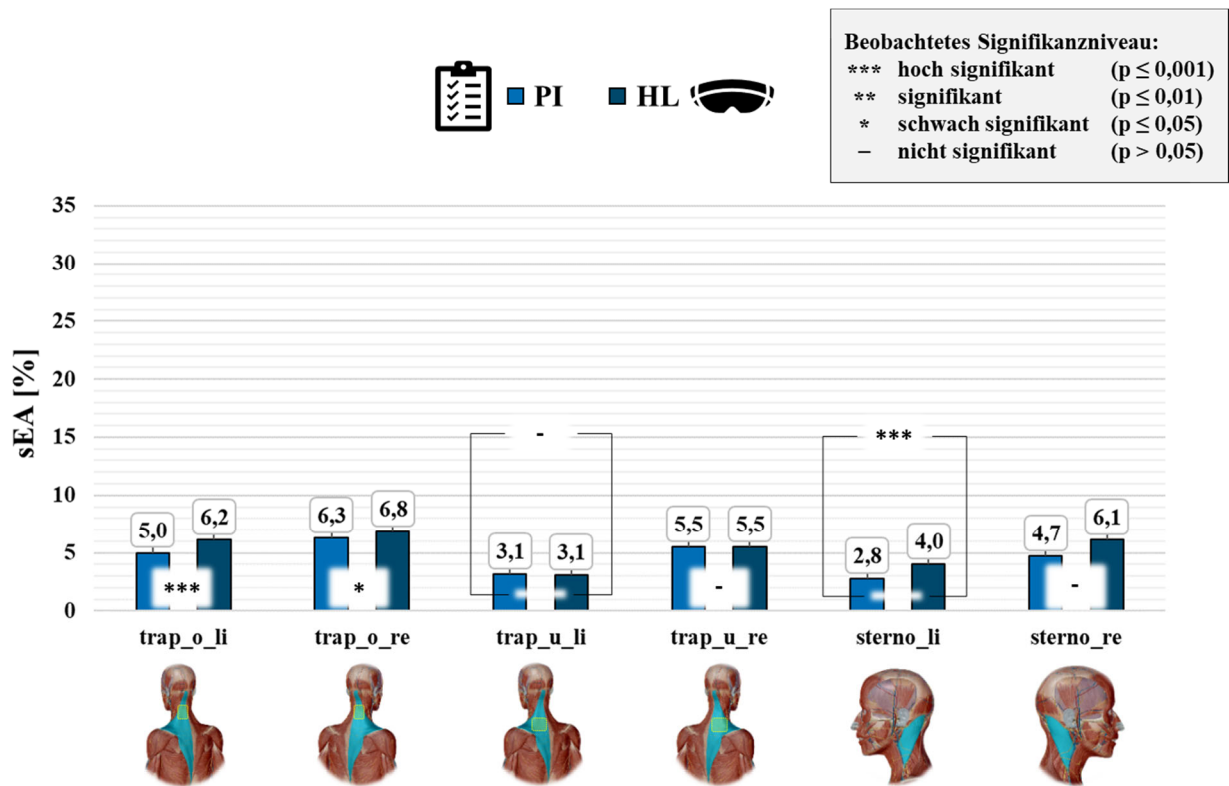


Abb. 8.25: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während mittelstarker Blickpositionen

Im Zuge der vertikalen Kopfauslenkungen sind die Muskelaktivitäten hinsichtlich der Ansteuerung der Deckenpositionen für die entgegen der Blickrichtung liegenden m. sternocleidomastoidei relevant erhöht. Diese Muskeln weisen im Vergleich der Durchführung mit und ohne die AR-Brille sowohl linksseitig ($M_{PI} = 11,1 \pm 5,9 \%$, $M_{HL} = 14,7 \pm 6,5 \%$, $t = -2,818$, $p = 0,017$, $d = 0,814$) als auch rechtsseitig ($M_{PI} = 17,7 \pm 13,2 \%$, $M_{HL} = 18,5 \pm 10,7 \%$, $t = -0,526$, $p = 0,609$, $d = 0,152$) die höchsten Messwerte auf. Die standardisierten elektromyographischen Aktivitäten der übrigen beobachteten Muskeln bzw. Muskelstellen bewegen sich innerhalb der Deckenpositionen im Mittel auf einem insgesamt niedrigeren Niveau (z. B. oberer linksseitiger Trapez-Muskel: $M_{PI} = 4,1 \pm 1,8 \%$, $M_{HL} = 4,5 \pm 1,9 \%$, $t = -2,682$, $p = 0,021$, $d = 0,774$). Die jeweiligen Blickpositionen in Bodenrichtung zeigen eine erhöhte Muskelaktivierung des oberen Teils des m. trapezius pars descendens in Blickrichtung (linksseitig: $M_{PI} = 9,0 \pm 5,5 \%$, $M_{HL} = 13,4 \pm 7,0 \%$, $t = -4,219$, $p = 0,001$, $d = 1,218$). Außerdem weisen beide m. sternocleidomastoidei sowohl bei zentraler Blickposition (rechtsseitig: $M_{PI} = 4,4 \pm 8,6 \%$, $M_{HL} = 15,7 \pm 24,5 \%$, $t = -2,342$, $p = 0,039$, $d = 0,676$; linksseitig: $M_{PI} = 3,2 \pm 3,1 \%$, $M_{HL} = 11,2 \pm 11,0 \%$, $t = -2,824$, $p = 0,017$, $d = 0,815$) als auch bei seitlicher Positionsabfrage entgegen der eingenommenen Blickrichtung (rechtsseitig: $M_{PI} = 7,3 \pm 3,7 \%$, $M_{HL} = 13,3 \pm 5,6 \%$, $t = -4,132$, $p = 0,002$, $d = 1,193$; linksseitig: $M_{PI} = 8,4 \pm 5,0 \%$, $M_{HL} = 11,0 \pm 5,0 \%$, $t = -2,041$, $p = 0,066$, $d = 0,589$) ähnliche Aktivitäten und signifikante Messwertunterschiede auf.

Die gestenbasierte Interaktion offenbart insbesondere auf der gestenausführenden (rechten) Körperseite eine deutliche muskuläre Beanspruchung des m. trapezius pars descendens. Hiervon betroffen sind vor allem die Mittelwertunterschiede für dessen unteren Muskelteil, der bei steigender vertikaler Blickrichtung größere Werte annimmt ($M_{PI} = 20,2 \pm 7,7 \%$, $M_{HL} = 22,5 \pm 9,8 \%$, $t = -0,819$, $p = 0,432$, $d = 0,247$). Auch der obere Teil des Muskels erreicht bei gegenüberliegenden Blickpositionen sowohl bei mittiger Position ($M_{PI} = 21,8 \pm 11,1 \%$, $M_{HL} = 24,1 \pm 13,1 \%$, $t = -1,681$, $p = 0,124$, $d = 0,507$) als auch bei steigender vertikaler Blickposition ähnlich hohe Werte ($M_{PI} = 22,0 \pm 10,7 \%$, $M_{HL} = 27,7 \pm 16,2 \%$, $t = -2,249$, $p = 0,048$, $d = 0,678$). Die erfassten Messwerte zur Muskelbeanspruchung der gestenfernen (linken) Seite des oberen Trapez-Muskels liegen mit $15,5 (\pm 5,8) \%$ bei Nutzung der HoloLens und $13,1 (\pm 4,1) \%$ ohne Anwendung der Brille weitgehend unterhalb der im Rahmen schwerer seitlicher Kopfbewegungen beobachteten Ergebnisse ($t = -2,728$, $p = 0,021$, $d = 0,823$). Die Auswirkungen des Air-tap auf die entsprechende untere linke Stelle des m. trapezius pars descendens ($M_{PI} = 4,3 \pm 4,5 \%$, $M_{HL} = 4,0 \pm 3,8 \%$, $t = 0,282$, $p = 0,784$, $d = 0,085$) sowie auf die m. sternocleidomastoidei (linksseitig: $M_{PI} = 0,8 \pm 0,7 \%$, $M_{HL} = 0,9 \pm 0,7 \%$, $t = -0,359$, $p = 0,727$, $d = 0,108$; rechtsseitig:

$M_{PI} = 2,4 \pm 2,0 \%$, $M_{HL} = 2,8 \pm 1,6 \%$, $t = 0,458$, $p = 0,657$, $d = 0,138$) sind äußerst gering einzuschätzen.

Insgesamt führt die Verwendung der HoloLens zu einer tendenziell mehr oder weniger stark erhöhten Muskelaktivität bei der Beobachtung von statischen Blickpositionen. Dabei zeigt sich, dass eine substanziell erhöhte absolute Mehrbeanspruchung nur diejenigen Muskeln bzw. Muskelstellen betrifft, die bereits ohne den Einsatz des HMDs eine erhöhte Aktivierung aufweisen.

Einfache Montagetätigkeit

Dass zwischen der Anwendung der HoloLens im Vergleich zu einer papierbasierten Instruktion im Zuge der einfachen Montagetätigkeit ein hoch signifikanter und effektstarker Einfluss besteht, wurde bereits exemplarisch in Kapitel 7.4.4 bewiesen. Die Versuchsreihe kann die Erkenntnisse aus dem vorherigem Testlayout außerdem weitgehend bestätigen. Die entgegen der Blickrichtung liegenden m. sternocleidomastoidei (rechtsseitig: $M_{PI} = 17,6 \pm 12,2 \%$, $M_{HL} = 26,5 \pm 11,1 \%$, $t = -1,931$, $p = 0,082$, $d = 0,582$; linksseitig: $M_{PI} = 19,2 \pm 15,3 \%$, $M_{HL} = 31,4 \pm 16,5 \%$, $t = -2,781$, $p = 0,018$, $d = 0,803$) und die sich in Blickrichtung befindlichen oberen Stellen des m. trapezius pars descendens (rechtsseitig: $M_{PI} = 11,7 \pm 8,1 \%$, $M_{HL} = 20,2 \pm 10,2 \%$, $t = -7,404$, $p < 0,001$, $d = 2,132$; linksseitig: $M_{PI} = 12,4 \pm 14,2 \%$, $M_{HL} = 15,7 \pm 6,5 \%$, $t = -1,235$, $p = 0,243$, $d = 0,356$) weisen im Rahmen starker seitlicher Kopfbewegung ebenfalls die größten durch den Einsatz des HMDs hervorgerufenen muskulären Aktivitäten auf. Die Grundaussagen des vorherigen Versuchs können aber sowohl für in Blickrichtung als auch für in entgegengesetzter Blickrichtung aktivierte Muskeln tendenziell übernommen werden. Erneut weisen die leichten bis mittelstarken seitlichen Kopfbewegungen keinen schwerwiegenden muskulären Mehraufwand auf (z. B. unterer linksseitiger m. trapezius pars descendens: $M_{PI} = 5,3 \pm 5,6 \%$, $M_{HL} = 6,7 \pm 8,4 \%$, $t = -1,453$, $p = 0,174$, $d = 0,419$).

In Bezug auf die Montagetätigkeit selbst kann die zu beobachtende Variabilität der Ergebnisse bestätigt werden. Die muskuläre Aktivität der m. sternocleidomastoidei fällt, wie den Abbildungen 8.26, 8.27 und 8.28 entnommen werden kann, bei allen drei Tischhöhen bzw. Montageorten gering aus (z. B. rechtsseitig, Montagetisch „Ellenbogenhöhe“: $M_{PI} = 1,1 \pm 1,0 \%$, $M_{HL} = 1,3 \pm 1,2 \%$, $t = -1,444$, $p = 0,176$, $d = 0,417$).

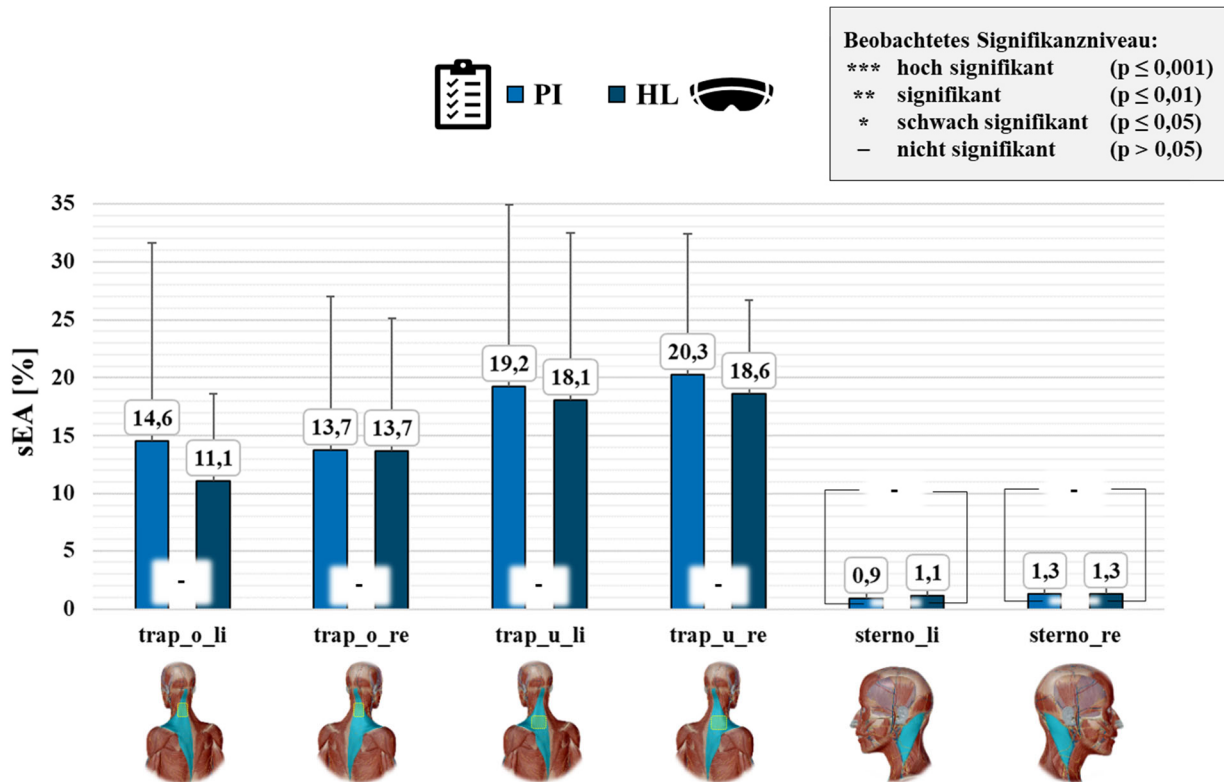


Abb. 8.26: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während der einfachen Montagetätigkeit in „Schulterhöhe“

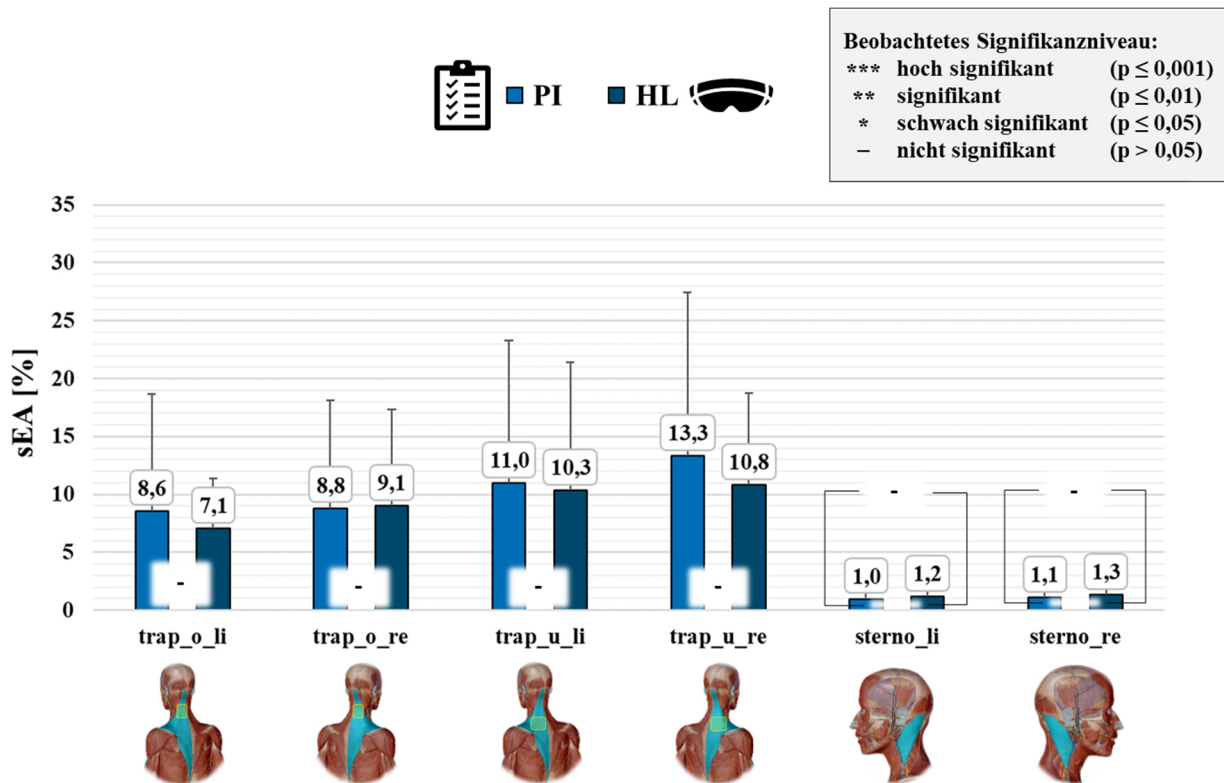


Abb. 8.27: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während der einfachen Montagetätigkeit in „Ellenbogenhöhe“

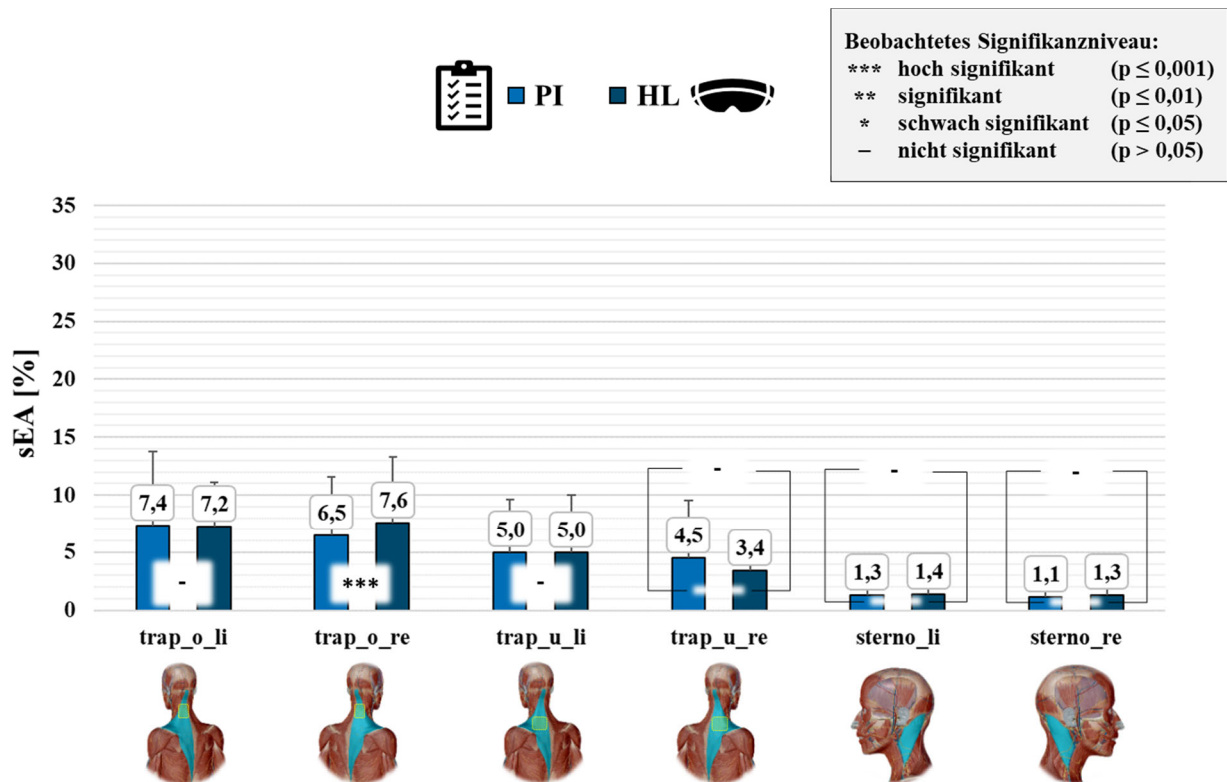


Abb. 8.28: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während der einfachen Montagetätigkeit in „Schritthöhe“

Zudem geht aus den Ergebnissen hervor, dass die unteren m. trapezii pars descendens im Zuge der Montagetätigkeit stärker beansprucht werden (z. B. linksseitig, Montagetisch „Schulterhöhe“: $M_{PI} = 19,2 \pm 15,7 \%$, $M_{HL} = 18,1 \pm 14,4 \%$, $t = 1,054$, $p = 0,314$, $d = 0,304$) als der obere Teil des m. trapezius pars descendens ($M_{PI} = 14,6 \pm 17,0 \%$, $M_{HL} = 11,1 \pm 7,6 \%$, $t = 1,178$, $p = 0,264$, $d = 0,340$). Je niedriger die Montagehöhe ist, desto geringere muskuläre Aktivitäten werden verzeichnet. Am Beispiel des unteren rechtsseitigen Trapez-Muskels wird dieser Sachverhalt verdeutlicht:

- Montagehöhe „Schulter“: $M_{PI} = 20,3 \pm 12,2 \%$, $M_{HL} = 18,6 \pm 8,1 \%$, $t = 0,687$,
 $p = 0,506$, $d = 0,198$
- Montagehöhe „Ellenbogen“: $M_{PI} = 13,3 \pm 14,1 \%$, $M_{HL} = 10,8 \pm 8,0 \%$, $t = 1,080$,
 $p = 0,303$, $d = 0,312$
- Montagehöhe „Schritt“: $M_{PI} = 4,5 \pm 5,0 \%$, $M_{HL} = 3,4 \pm 2,8 \%$, $t = 1,390$,
 $p = 0,192$, $d = 0,401$

Eine eindeutige bzw. allumfassend signifikante Erkenntnis hinsichtlich einer Mehrbeanspruchung durch die Nutzung der HoloLens kann nicht festgestellt werden. Neben den fehlenden statistischen Signifikanzen weist nur die Hälfte der Mittelwertsunterschiede eine stärkere muskuläre Aktivierung der Muskelpartien bei Anwendung der AR-basierten Datenbrille auf.

8.5.1.2 Wärmebildaufnahmen des Kopfbereiches

Neben erhöhten muskulären Belastungen und Beanspruchungen im Schulter-Nackengebiet konnten im Zuge der Versuchsdurchführung mit und ohne HoloLens zusätzlich signifikante Unterschiede der Hautoberflächentemperatur im Kopfbereich festgestellt werden. Sämtliche Datenreihen unterliegen einer Normalverteilung (z. B. $SW_{Mont, Stirn, PI} = 0,956$, $p_{Mont, Stirn, PI} = 0,725$; $SW_{BlickG, Nase, HL} = 0,935$, $p_{BlickG, Nase, HL} = 0,431$).

Die Nutzung der Datenbrille ruft Komfortbeeinträchtigungen hervor, die insbesondere an den Auflagepunkten des Kopfträgers im Gesicht des Anwenders, d. h. an Stirn und Nase, durch eine leicht erhöhte Hautoberflächentemperatur messtechnisch (siehe Abb. 8.29-8.30) und visuell (siehe Abb. 8.31) ersichtlich werden.

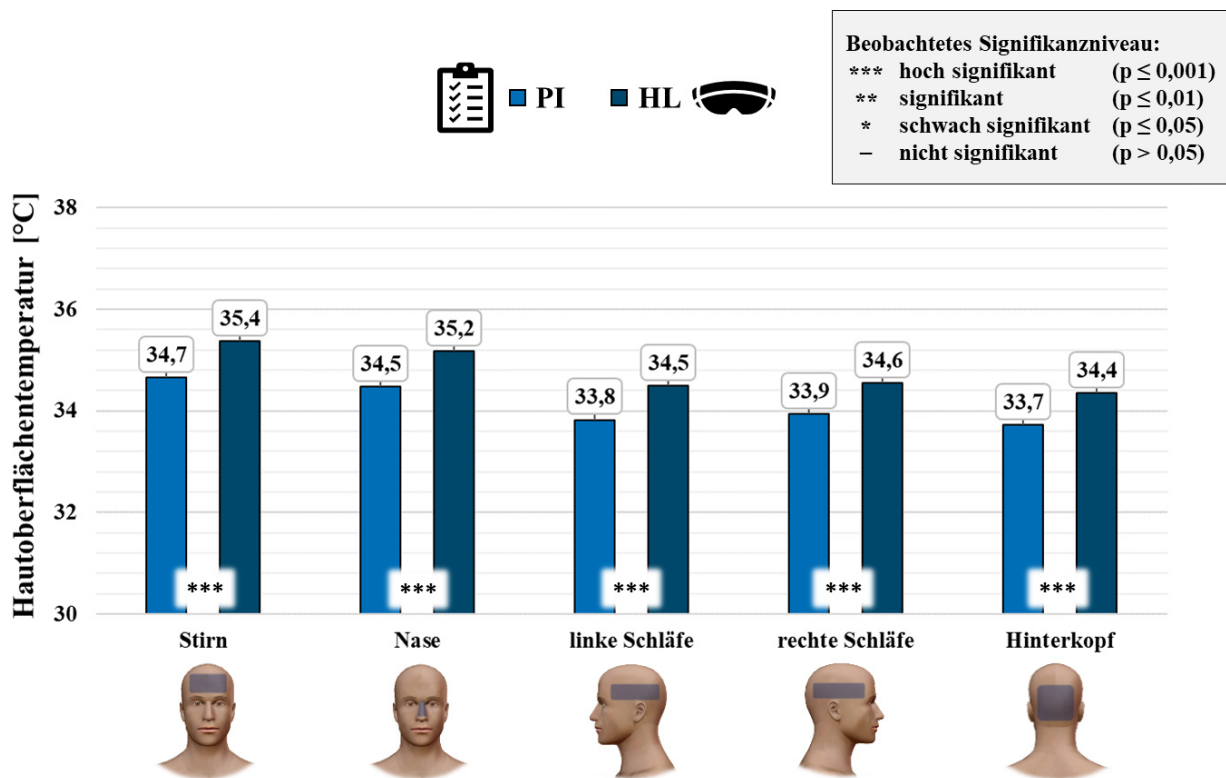


Abb. 8.29: Hautoberflächentemperatur [°C] der Auflagepunkte der Datenbrille im Kopfbereich des Nutzers unmittelbar nach der Montagetätigkeit

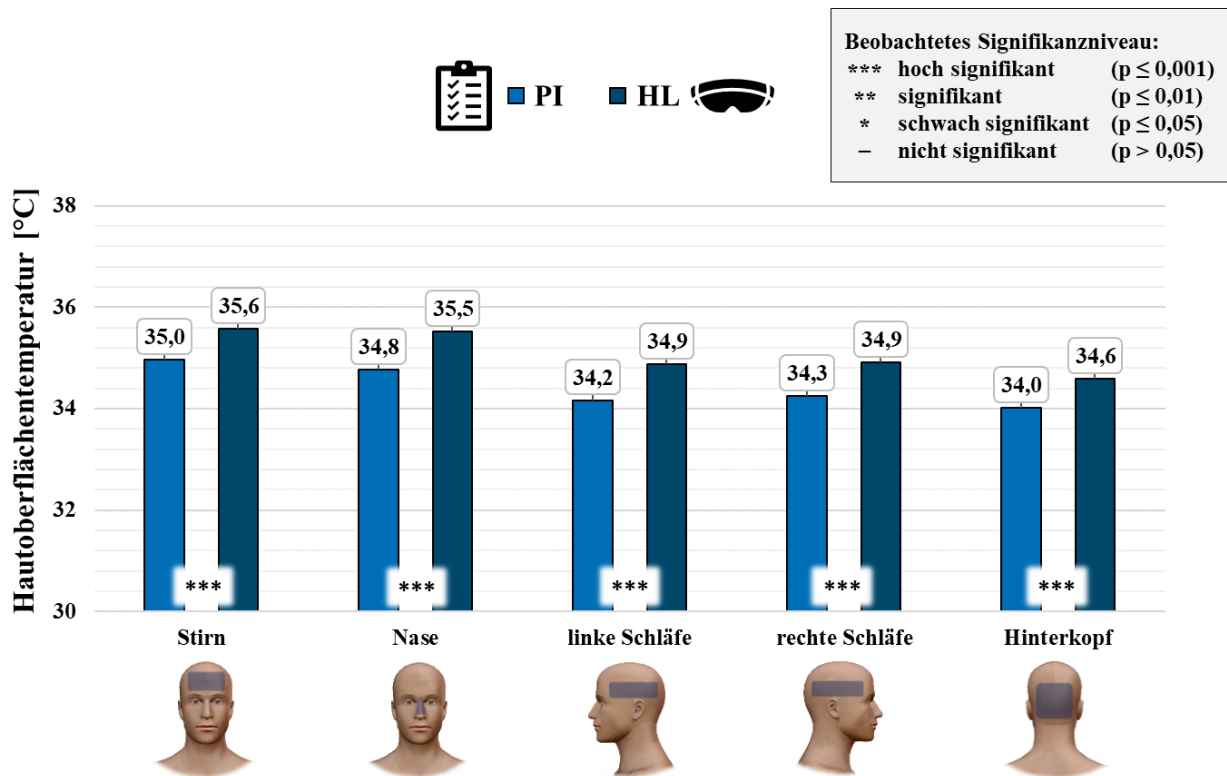


Abb. 8.30: Hautoberflächentemperatur [°C] der Auflagepunkte der Datenbrille im Kopfbereich des Nutzers unmittelbar nach der gestengesteuerten Blickpositionieraufgabe

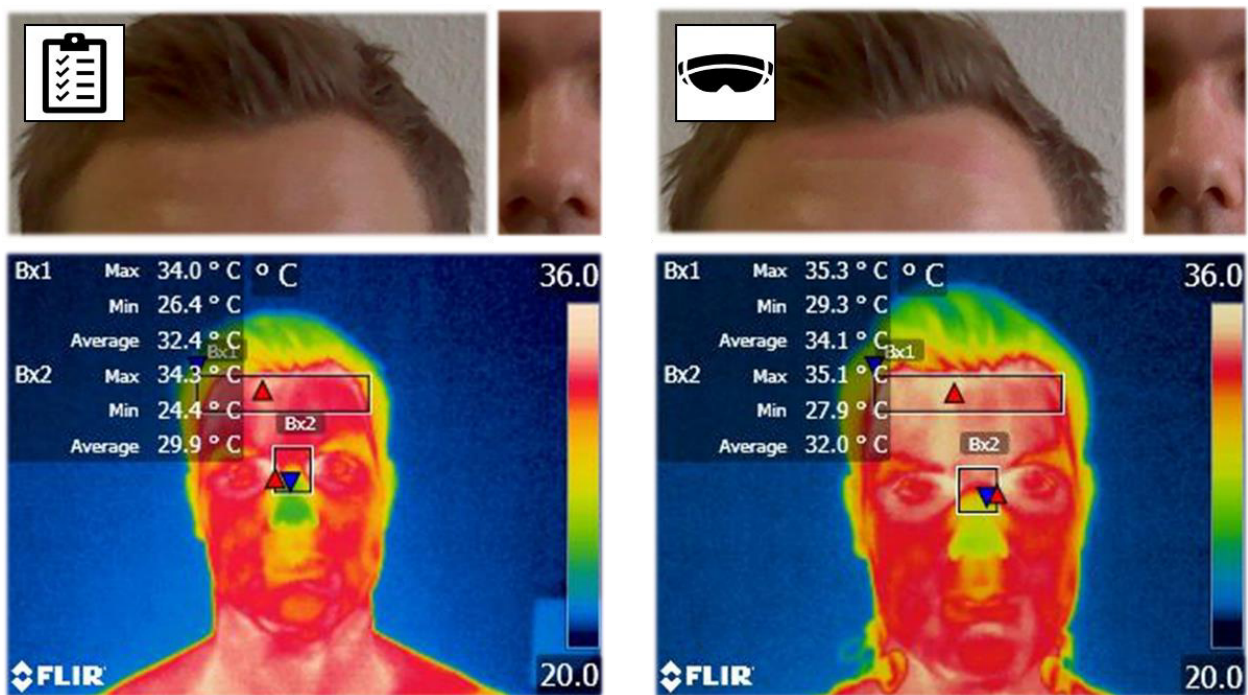


Abb. 8.31: Hautoberflächentemperaturen und etwaige Anzeichen von Durchblutungsstörungen an der Stirn und der Nase ohne (links) und mit Nutzung der Datenbrille (rechts) am Beispiel von VP03 nach der einfachen Montagetätigkeit

Zu Beginn der Versuchsdurchführung konnten im Zuge der Montagetätigkeit neben dem Stirn- ($M_{PI} = 34,7 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 35,4 \pm 0,7 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -7,176$, $p < 0,001$, $d = 2,071$) und Nasenbereich ($M_{PI} = 34,5 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 35,2 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -2,596$, $p < 0,001$, $d = 3,238$) auch für die links- ($M_{PI} = 33,8 \pm 0,7 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,5 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -1,509$, $p < 0,001$, $d = 2,580$) und rechtsseitige Schläfe ($M_{PI} = 33,9 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,6 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -1,509$, $p < 0,001$, $d = 2,116$) sowie für den Hinterkopf ($M_{PI} = 33,7 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,4 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -4,539$, $p < 0,001$, $d = 1,310$) der Anwender hoch signifikante und effektstarke Messwertunterschiede zwischen den Durchführungsmodi festgestellt werden. Die Temperaturwerte der einzelnen Stellen des Kopfbereiches bewegen sich auf einem Niveau von mindestens $33 \text{ } ^\circ\text{C}$ bis maximal $37 \text{ } ^\circ\text{C}$. Mit fortschreitender Versuchsdauer zeigt sich am Beispiel der gestengesteuerten Blickpositionieraufgabe, dass das Temperaturprofil aller Kopfbereiche marginal ansteigt und die zentrale Tendenz des Mittelwertunterschieds in einem vergleichbaren Umfang beibehalten wurde:

- Stirn: $M_{PI} = 35,0 \pm 0,7 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 35,6 \pm 0,7 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -10,669$,
 $p < 0,001$, $d = 3,080$
- Nase: $M_{PI} = 34,8 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 35,5 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -11,218$,
 $p < 0,001$, $d = 3,238$
- Rechtsseitige Schläfe: $M_{PI} = 34,3 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,9 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -9,834$, $p < 0,001$,
 $d = 2,839$
- Linksseitige Schläfe: $M_{PI} = 34,2 \pm 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,9 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -8,937$, $p < 0,001$,
 $d = 2,580$
- Hinterkopf: $M_{PI} = 34,0 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,6 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = -8,971$, $p < 0,001$,
 $d = 2,590$

8.5.2 *Subjektive Beurteilung der Arbeitsaufgaben*

Neben den vorgestellten arbeitsphysiologischen Messungen wurden auch Befragungen zum Umgang mit dem AR-basierten Unterstützungssystem durchgeführt. Die arbeitspsychologisch orientierte, strukturierte Befragung setzte sich aus standardisierten Fragebogeninstrumentarien und an die Arbeitsaufgabe ausgerichteten spezifischen Fragen zusammen.

8.5.2.1 *Subjektives physisches Beanspruchungserleben*

Zusätzlich zu den muskulären Beanspruchungsempfindungen gaben die Probanden ihre subjektive Einschätzung zu den in Folge der Arbeitsausführungen resultierenden Wärmeempfindungen im Kopfbereich an.

Empfundene muskuläre Beanspruchung

Die Daten zur subjektiv empfundenen muskulären Beanspruchung unterliegen für die Beurteilung der Montagetätigkeit (z. B. oberer rechtsseitiger m. trapezius pars descendens: $KS_{Mont, PI} = 0,309$, $p_{Mont, PI} = 0,002$; $KS_{Mont, HL} = 0,304$, $p_{Mont, HL} = 0,003$) und der sprachbasierten Interaktion ($KS_{BlickS, PI} = 0,250$, $p_{BlickS, PI} = 0,037$; $KS_{BlickS, HL} = 0,258$, $p_{BlickS, HL} = 0,026$) mehrheitlich keiner Normalverteilung. Einzig im Zuge der gestengesteuerten Versuchsdurchführung konnten normalverteilte Daten festgestellt werden ($KS_{BlickG, PI} = 0,205$, $p_{BlickG, PI} = 0,174$; $KS_{BlickG, HL} = 0,201$, $p_{BlickG, HL} = 0,195$). Da nicht-parametrische Tests (zulasten einer geringeren Teststärke) auch auf normalverteilte Daten angewendet werden können, wird im vorliegenden Fall der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für abhängige bzw. verbundene Stichproben genutzt. Während der Nutzung eines AR-basierten Cyber-Physischen Systems wurde das subjektive Beanspruchungserleben im Vergleich zur jeweiligen Durchführung ohne Anwendung des Unterstützungssystems durch die Probanden als mehrheitlich signifikant stärker empfunden (siehe Abb. 8.32-8.33).

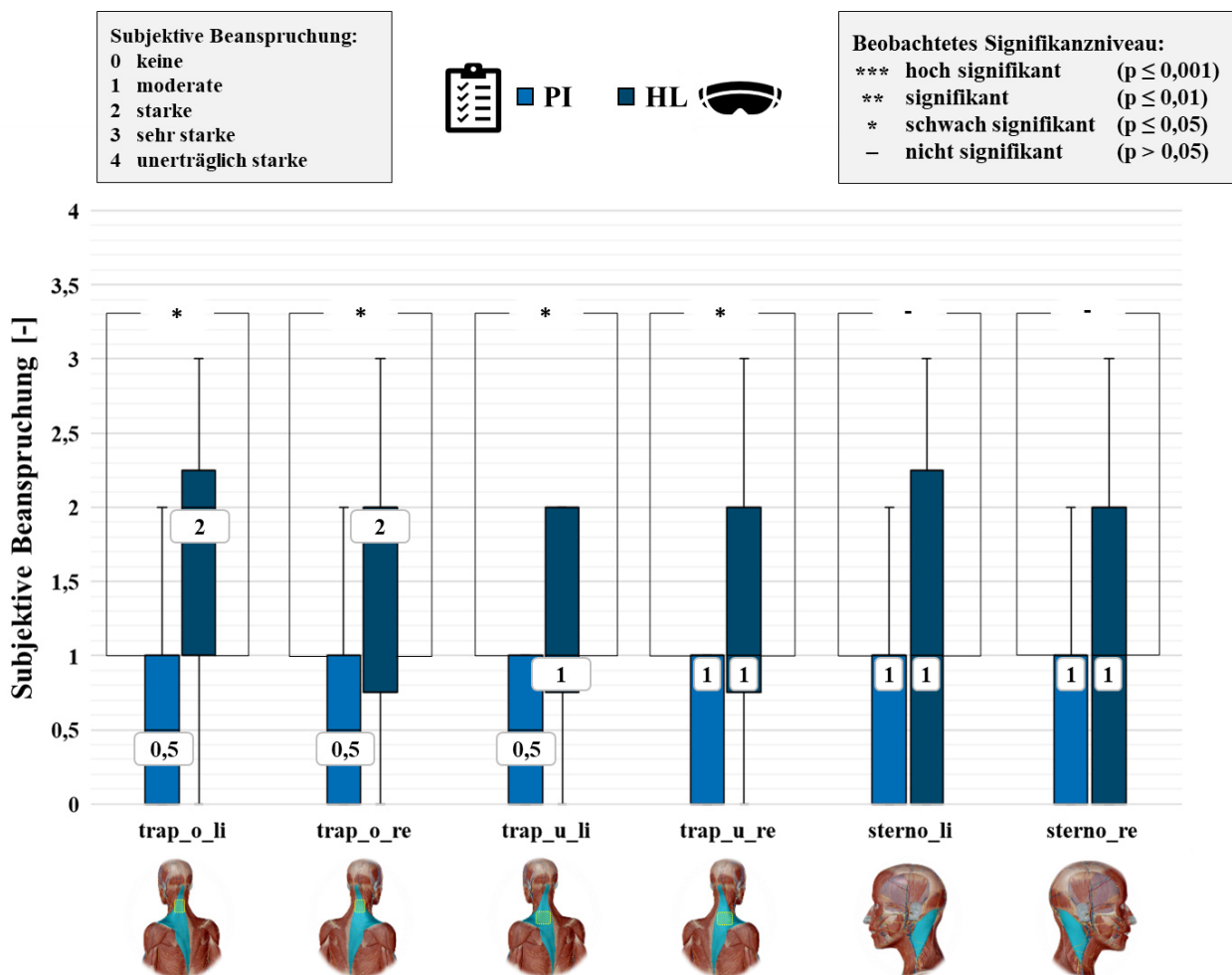


Abb. 8.32: Subjektive Muskelbeanspruchung im Zuge der Montagetätigkeit

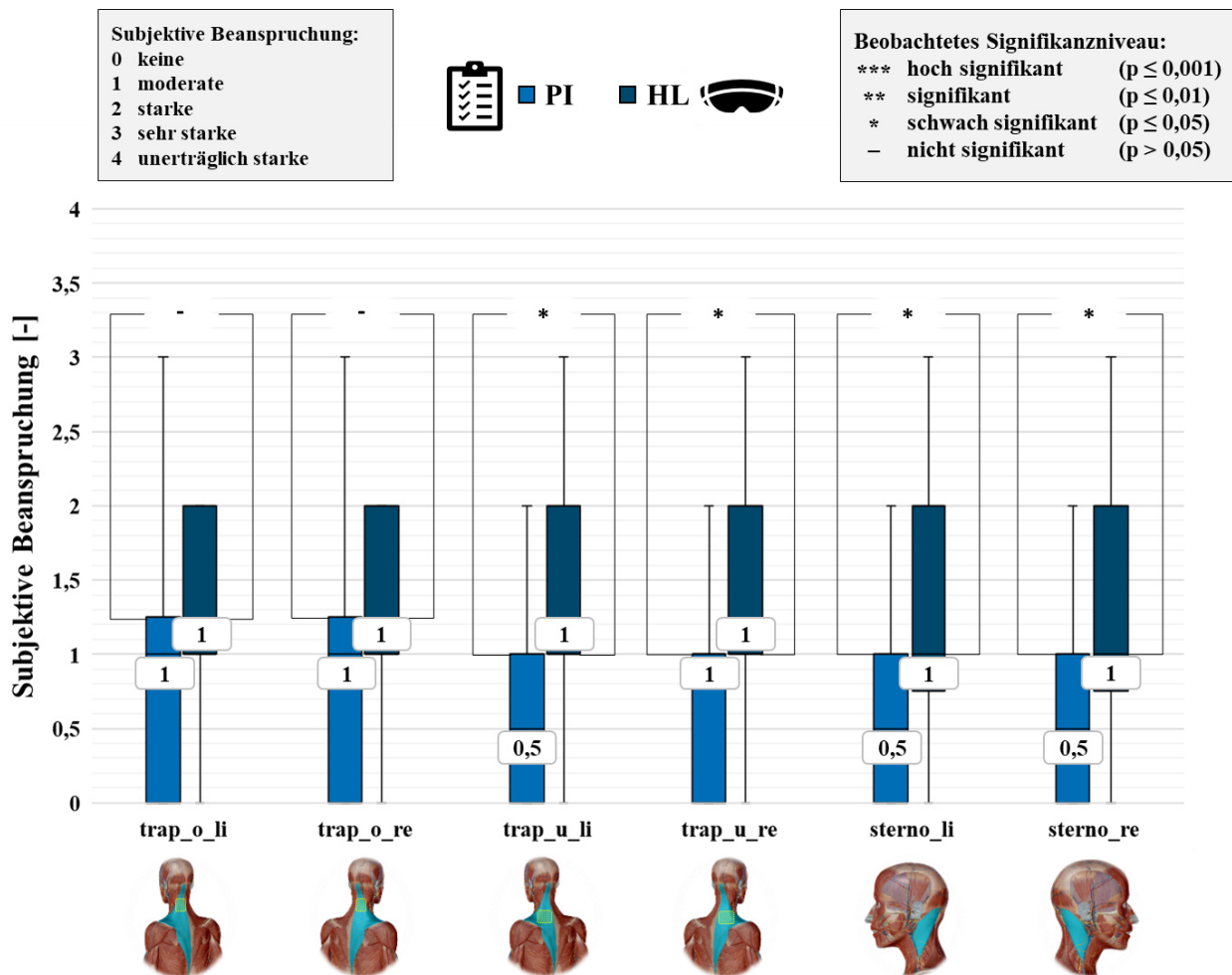


Abb. 8.33: Subjektive Muskelbeanspruchung im Zuge der sprachbasierten Blickpositionieraufgabe

Die innerhalb der Versuchsreihe „Einfache Montagetätigkeit“ gewonnenen Daten zeigen, dass die empfundene physische Beanspruchung der Probanden bei Anwendung der Papier-Instruktion hinsichtlich des 50. Perzentils zwischen „keiner“ und einer „moderaten“ Beeinträchtigung liegt (z. B. obere rechtsseitige m. trapezius pars descendens: $MD = 0,5$). Die Nutzung der HoloLens verschiebt diese Werte bis zu einer „starken“ Beanspruchung der Probanden ($MD = 2$, $z = -2,226$, $p = 0,026$, $r = 0,643$).

Für die statischen Blickpositionierungen gleicht sich das empfundene Beanspruchungsniveau im Vergleich beider Ausführungsvarianten an. Der Einsatz des HMD führt gleichermaßen wie die Durchführung ohne HMD bspw. dazu, dass für den unteren linken Teil des m. trapezius pars descendens eine moderate Beanspruchung ($MD_{PI} = 0,5$, $MD_{HL} = 1$, $z = -2,271$, $p = 0,023$, $r = 0,656$) erlebt wird (siehe Abb. 8.34).

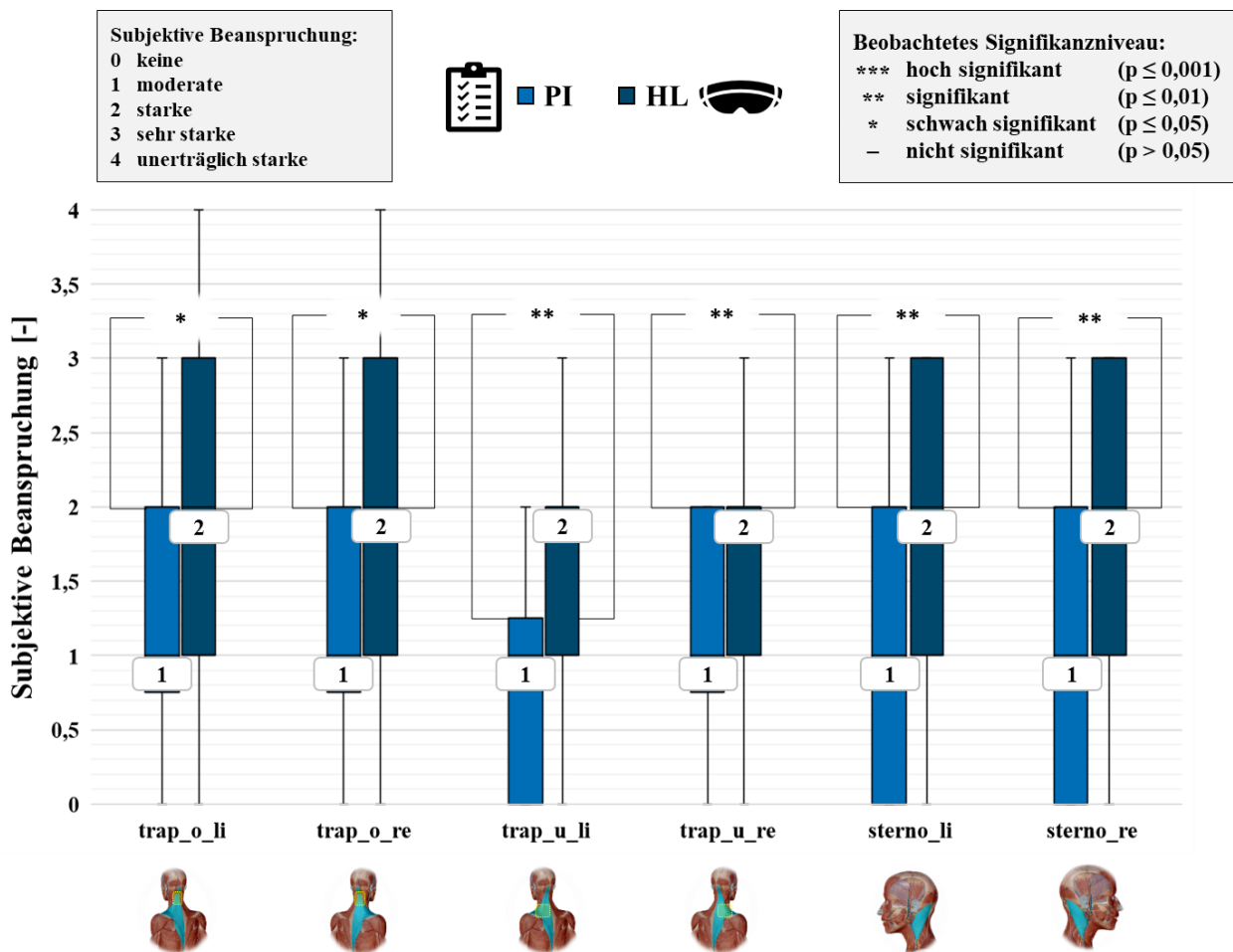


Abb. 8.34: Subjektive Muskelbeanspruchung im Zuge der gestenbasierten Blickpositionierungsaufgabe

Die gestenbasierte Steuerungsoption bedingt, dass die Probanden insgesamt eine stärkere muskuläre Beanspruchung verspüren. Sowohl der Einsatz mit als auch ohne HoloLens führt innerhalb dieses Versuchsrahmens zu den höchsten, signifikanten und mit einem starken Effekt versehenen Werteausprägungen (z. B. linksseitiger m. sternocleidomastoideus: $MD_{PI} = 1$, $MD_{HL} = 2$, $z = -2,640$, $p = 0,008$, $r = 0,762$). Die Mediane tendieren nun am oberen Ende der Skala zu einer überwiegend „starken“ subjektiven Beanspruchung.

Wärmeempfindungen im Kopfbereich

Mit Ausnahme der Datenreihen zur Beurteilung der wahrgenommenen Druckempfindung am Hinterkopf im Zuge der Montagetätigkeit ($KS = 0,185$, $p > 0,200$) und im Bereich der Nase im Rahmen der gestengesteuerten Versuchsdurchführung ($KS = 0,220$, $p = 0,114$) sind sämtliche Daten nicht normalverteilt (z. B. linke Schädelseite bei sprachgesteuerter Blickpositionierung: $KS = 0,329$, $p < 0,001$). Demzufolge wird erneut der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test herange-

zogen. Während die subjektiv empfundene muskuläre Beanspruchung des Schulter-Nacken-Bereichs ein „starkes“ Maß nicht überschritt, wurden durch die Probanden bei Anwendung der HoLoLens insbesondere im Bereich der Nase und der Stirn stärkere Wärme- bzw. Druckstellen lokalisiert. Sämtliche Median-Unterschiede konnten lediglich deskriptiv nachgewiesen werden (siehe Abb. 8.35).

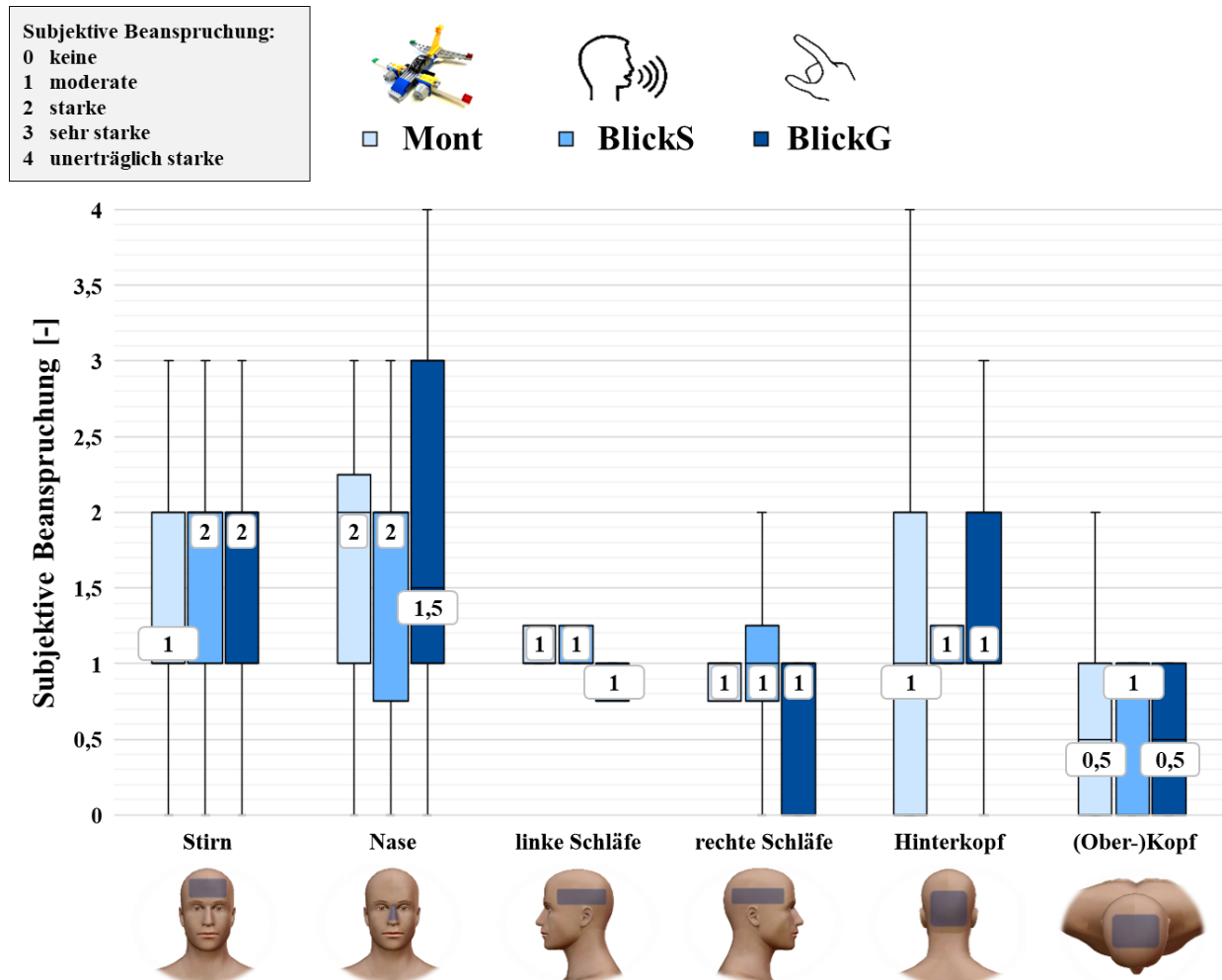


Abb. 8.35: Wärmeempfindungen im Kopfbereich während der unterschiedlichen Versuchsaufgaben

Im oberen Schädelbereich wurden durchweg geringfügige, d. h. „keine“ oder maximal „moderate“, Komplikationen hinsichtlich einer zu stark empfundenen Druck- bzw. Wärmebeanspruchung empfunden ($MD_{Mont} = 0,5$, $MD_{BlickS} = 1$, $z = -0,577$, $p = 0,564$, $r = 0,167$). Die für die rechte ($MD_{BlickS} = 1$, $MD_{BlickG} = 1$, $z = -1,732$, $p = 0,083$, $r = 0,500$) und linke Schläfe oder Schädelseite ($MD_{BlickS} = 1$, $MD_{BlickG} = 1$, $z = -1,732$, $p = 0,083$, $r = 0,500$) sowie hinsichtlich des Hinterkopfes ($MD_{BlickS} = 1$, $MD_{BlickG} = 1$, $z = -1,000$, $p = 0,317$, $r = 0,289$) erhobenen Daten sind hingegen leicht erhöht und können der Ausprägungsform „moderat“ zugeordnet werden. Die höchste Kom-

fortbeeinträchtigung während der Anwendung der HoloLens wurde mit einer moderaten bis starken subjektiven Wahrnehmung in den Kopfbereichen „Stirn“ ($MD_{Mont} = 1$, $MD_{BlickS} = 2$, $z = -0,447$, $p = 0,655$, $r = 0,129$) und „Nase“ ($MD_{Mont} = 2$, $MD_{BlickS} = 1,5$, $z = 0,000$, $p = 1,000$, $r = 0,000$) erlebt, die sich im Zuge der Versuchsdurchführung verstärkte bzw. sich auf einem konstant hohen Niveau bewegte (Stirn: $MD_{Mont} = 1$, $MD_{BlickG} = 2$, $z = -0,447$, $p = 0,655$, $r = 0,129$; Nase: $MD_{Mont} = 2$, $MD_{BlickG} = 1,5$, $z = 0,000$, $p = 1,000$, $r = 0,000$).

8.5.2.2 Rating Scale of Mental Effort

Die mentale Beanspruchung der Probanden wurde sowohl während (*w*), d. h. etwa nach der Hälfte der Durchführungszeit (14. Montageschritt bzw. 11. Blickpositionierung), als auch unmittelbar nach (*na*) der Versuchsdurchführung erfragt. Sämtliche Daten unterliegen einer Normalverteilung (z. B. $SW_{Mont, PI, w} = 0,964$, $p_{Mont, PI} = 0,840$; $SW_{BlickS, HL, w} = 0,959$; $p_{BlickS, HL, w} = 0,772$; $SW_{BlickG, HL, na} = 0,950$; $p_{BlickS, HL, na} = 0,632$). Die kognitive Beanspruchung nimmt insgesamt ein Anstrengungsniveau im oberen Grenzbereich des ersten Skalendrittels ein (siehe Abb. 8.36).

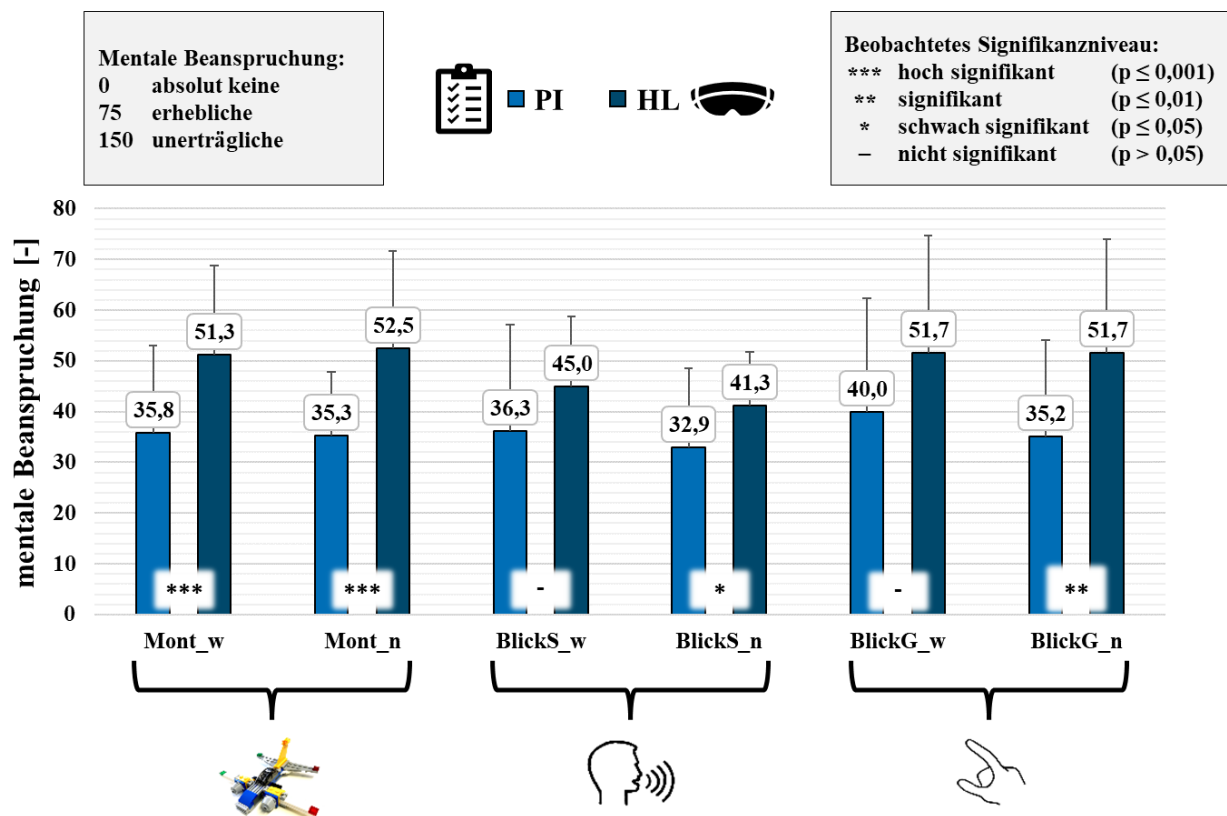


Abb. 8.36: Mentale Beanspruchung – gemessen anhand des RSME – während der unterschiedlichen Versuchsaufgaben

Im Zuge der Versuchsausführung steigt der kognitive Aufwand innerhalb eines Durchgangs marginal an, wenngleich zwischen den jeweils zwei erhobenen Messpunkten pro Ausführungsart

(z. B. $M_{Mont, HL, w} = 51,3 \pm 17,6$, $M_{Mont, HL, na} = 52,5 \pm 19,2$, $t = -0,383$, $p = 0,709$, $d = 0,111$) ebenso keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten, wie zwischen erstmaliger und letztmaliger Nutzung des Unterstützungssystems ($M_{Mont, HL, w} = 51,3 \pm 17,6$, $M_{BlickG, HL, na} = 51,7 \pm 22,3$, $t = -0,065$, $p = 0,949$, $d = 0,019$). Zusätzlich dazu wurde auch der Unterschied zwischen Verwendung der HoloLens und der Durchführung ohne HMD untersucht. Die Werte zeigen am Beispiel der Montagetätigkeit, dass die durch die Datenbrille hervorgerufene kognitive Beanspruchung in Bezug auf die gesamte Versuchsdurchführung hier als moderat erhöhte Anstrengung und damit am höchsten empfunden wurde. Sowohl während ($M_{PI} = 35,8 \pm 17,2$, $M_{HL} = 51,3 \pm 17,6$, $t = -5,407$, $p < 0,001$, $d = 1,561$) als auch nach dem Versuch ist der mentale Aufwand der Probanden im Rahmen der Datenbrillen-Anwendung signifikant höher als ohne deren Nutzung ($M_{PI} = 35,3 \pm 12,6$, $M_{HL} = 52,5 \pm 19,1$, $t = -4,767$, $p < 0,001$, $d = 1,507$). Diese Erkenntnis kann in abgeschwächter Form auch nach den beiden Versuchsreihen zu statischen Blickpositionierungen gewonnen werden. Sowohl bei der sprachgesteuerten ($M_{PI} = 32,9 \pm 15,6$, $M_{HL} = 41,3 \pm 10,5$, $t = -2,345$, $p = 0,039$, $d = 0,677$) als auch bei der gestenbasierten Interaktion ($M_{PI} = 35,2 \pm 19,0$, $M_{HL} = 51,7 \pm 22,3$, $t = -3,809$, $p = 0,003$, $d = 1,100$) wird die Aufgabe als etwas bis moderat anstrengend erlebt. Die kognitiven Unterschiede sind zwischen den Durchführungsmodi leicht signifikant bzw. signifikant.

8.5.2.3 NASA Task Load Index

Die sechs Dimensionen des NASA Task Load Index (geistige Anforderung, *GA*; körperliche Anforderung, *KA*; zeitliche Anforderung, *ZA*; Leistung, *L*; Anstrengung, *A*; Frustration, *F*) wurden während des gesamten Versuchsablaufs unmittelbar nach dem ersten Einsatz der HoloLens im Zuge der Montagetätigkeit und nach der letzten Verwendung des HMD im Anschluss an die gestengesteuerte statische Blickpositionierungsaufgabe evaluiert. Zusätzlich wurden die einzelnen Dimensionen paarweise verglichen, um eine gewichtete Gesamtbeanspruchung (*G*) der normalverteilten Datenreihen ($KS_{Mont, A} = 0,174$, $p_{Mont, A} > 0,200$; $KS_{Mont, G} = 0,160$, $p_{Mont, G} > 0,200$; $KS_{Blick, L} = 0,201$, $p_{Blick, L} = 0,194$) zu bestimmen. Die Beanspruchung wird insgesamt durchschnittlich als mittelstark empfunden (siehe Abb. 8.37).

Die deskriptive Analyse zeigt, dass der Unterschied der Gesamtbeanspruchung zwischen den beiden Messungen sehr gering ist ($M_{Mont} = 40,2 \pm 8,6$, $M_{Blick} = 39,5 \pm 14,1$). Auch die induktive Statistik zeigt einen nicht-signifikanten und effektlosen Unterschied zwischen den beiden Messpunkten ($t = 0,174$, $p = 0,865$, $d = 0,05$).

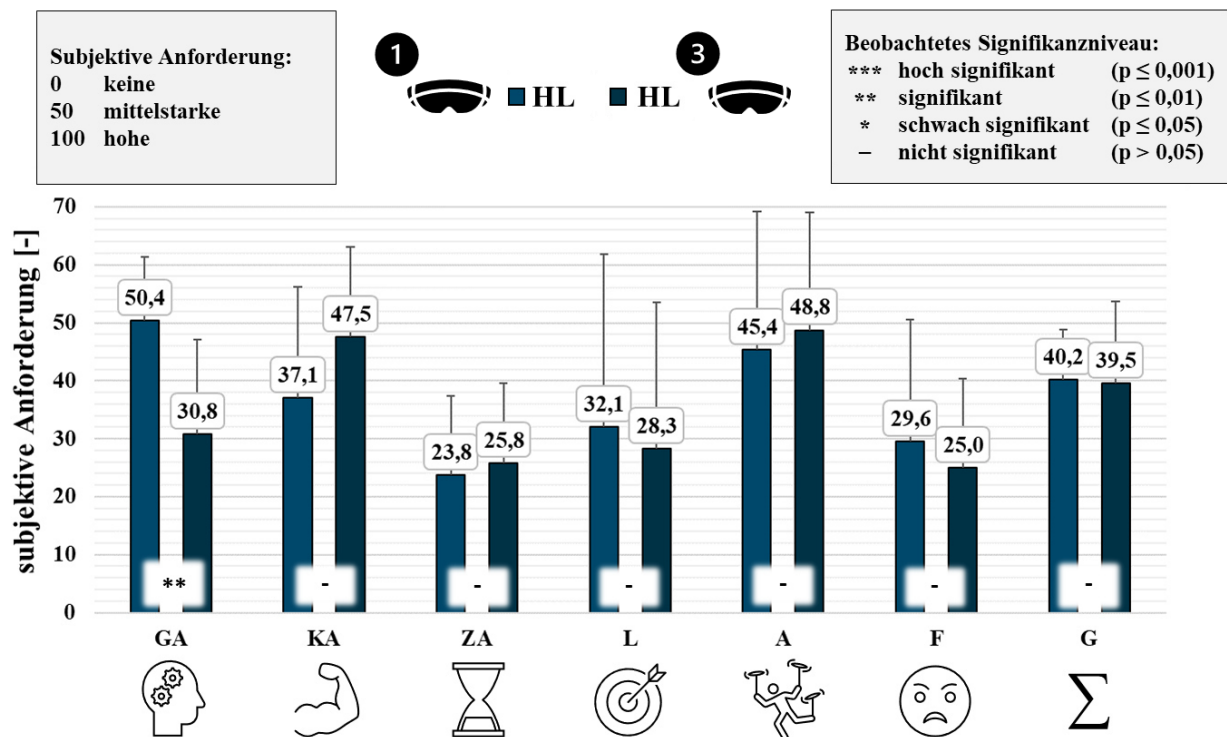


Abb. 8.37: Subjektive Anforderungen – gemessen anhand des NASA-TLX – im Vergleich der erstmaligen und letzten Versuchsdurchföhrung im Zuge der HoloLens-Nutzung

Mit Ausnahme der geistigen und k6rperlichen Anforderung konnten im Rahmen der Analyse der einzelnen Dimensionen keine schwerwiegenden Differenzen zwischen den Ausföhrungen festgestellt werden. W6hrend sich die erlebte geistige Anforderung von einer mittelstarken ($M = 50,4 \pm 11,0$) auf eine moderate ($M = 30,8 \pm 16,2$, $t = 3,713$, $p = 0,003$, $d = 1,072$) Beanspruchung reduziert, steigt die k6rperliche Anforderung mit fortschreitender Versuchsdauer an. Ein Vergleich der statischen Aufgabe, bei der durch Gestensteuerung mit der HoloLens interagiert wurde, mit der Montaget6tigkeit zeigt, dass die Blickpositionieraufgabe die Probanden einerseits physisch st6rker fordert ($M_{Mont} = 37,1 \pm 19,1$, $M_{Blick} = 47,5 \pm 15,6$, $t = -1,948$, $p = 0,077$, $d = 0,562$). Andererseits bedingt die Montage des Lego-Bausatzes eine mit einem erh6hten Arbeitsaufwand ($M_{Mont} = 45,4 \pm 23,8$, $M_{Blick} = 48,8 \pm 20,4$, $t = -0,379$, $p = 0,712$, $d = 0,109$) einhergehende h6here geistige Anforderung seitens der Probanden. Die Probanden gaben weiterhin an, eine weitgehend zufriedenstellende bzw. erfolgreiche ($M_{Mont} = 32,1 \pm 29,8$, $M_{Blick} = 28,3 \pm 25,3$, $t = 0,342$, $p = 0,739$, $d = 0,099$) und wenig frustrierende ($M_{Mont} = 29,6 \pm 21,0$, $M_{Blick} = 25,0 \pm 15,4$, $t = 0,554$, $p = 0,590$, $d = 0,160$) Bew6ltigung der Versuchsaufgaben ohne massiven zeitlichen Druck ($M_{Mont} = 23,8 \pm 13,7$, $M_{Blick} = 25,8 \pm 13,8$, $t = -0,671$, $p = 0,516$, $d = 0,194$) erlebt zu haben.

8.5.2.4 Visual Fatigue Questionnaire

Sämtliche 16 Items des „Visual Fatigue Questionnaire“-Fragebogens weisen nur geringfügige Unterschiede der visuellen Ermüdung zwischen dem Beginn und dem Ende der jeweiligen Versuchsdurchführung sowie zwischen der Nutzung mit und ohne HoloLens auf, sodass nachfolgend lediglich die größten Differenzen beschrieben werden. Die Datenreihen sind mehrheitlich nicht normalverteilt (z. B. $SW_{Mont, Trockene\ Augen, PI} = 0,799$, $p_{Mont, Trockene\ Augen, PI} = 0,009$; $SW_{BlickS, Kopfschmerzen, HL} = 0,802$, $p_{BlickS, Kopfschmerzen, HL} = 0,010$). Einzig die Daten zu den Symptomen „Nackenschmerzen“ ($SW_{BlickS, Nackenschmerzen, HL} = 0,904$, $p_{BlickS, Nackenschmerzen, HL} = 0,178$) und „Geistige Ermüdung“ ($SW_{BlickG, Geistige\ Ermüdung, HL} = 0,920$, $p_{BlickG, Geistige\ Ermüdung, HL} = 0,284$) unterliegen einer Normalverteilung. Die Probanden verspürten mit Ausnahme der wahrgenommenen Nackenschmerzen und der geistigen Ermüdung zu Beginn des Versuchs bzw. im Zuge der Montageausführung verstärkte visuelle Belastungen, die sich allerdings im Vergleich zur Ansteuerung definierter Positionen nur geringfügig unterscheiden und lediglich ein maximal moderates Beanspruchungsmaß annehmen.

Die von den Probanden empfundenen Nackenschmerzen nahmen durch die Nutzung der HoloLens im Laufe des Versuchs kontinuierlich und signifikant zu (siehe Abb. 8.38). Das Symptom wurde annähernd als „etwas bemerkbar“ und damit sowohl während der Montagetätigkeit ($M_{PI} = 36,6 \pm 30,2$, $M_{HL} = 33,8 \pm 31,6$, $t = 0,250$, $p = 0,807$, $d = 0,072$) als auch im Zuge der sprachgesteuerten ($M_{PI} = 23,8 \pm 22,4$, $M_{HL} = 35,3 \pm 26,2$, $t = -3,745$, $p = 0,003$, $d = 1,081$) und gestengesteuerten Interaktion mit der HoloLens ($M_{PI} = 28,8 \pm 22,8$, $M_{HL} = 44,2 \pm 32,4$, $t = -3,600$, $p = 0,004$, $d = 1,039$) insgesamt am stärksten erlebt. Eine ähnliche Erkenntnis konnte hinsichtlich der geistigen Ermüdung gewonnen werden, die allerdings ein vermindertes Beanspruchungsniveau einnahm (Montagetätigkeit: $M_{PI} = 25,1 \pm 21,5$, $M_{HL} = 20,4 \pm 22,5$, $t = 0,478$, $p = 0,642$, $d = 0,138$; Statische Blickpositionieraufgabe (sprachbasiert): $M_{PI} = 15,6 \pm 15,8$, $M_{HL} = 25,4 \pm 23,6$, $t = -2,029$, $p = 0,067$, $d = 0,586$; Statische Blickpositionieraufgabe (gestengesteuert): $M_{PI} = 24,7 \pm 23,0$, $M_{HL} = 31,9 \pm 27,6$, $t = -3,383$, $p = 0,006$, $d = 0,977$). Die bemerkbaren Symptomerscheinungen steigerten sich im direkten Vergleich der erstmaligen und letztmaligen Anwendung des Unterstützungssystems entsprechend um 30,9 % bzw. 56,3 %.

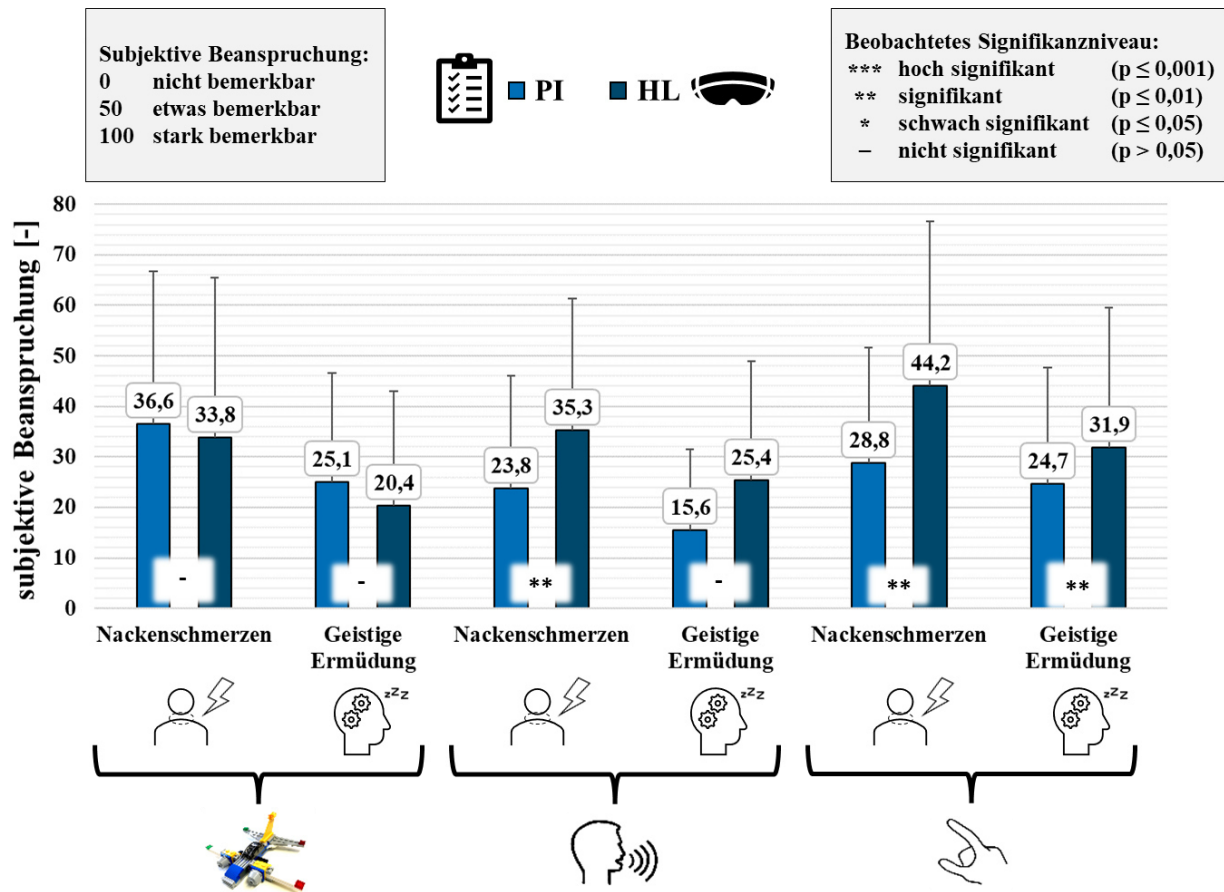


Abb. 8.38: Subjektiv empfundene Nackenschmerzen und geistige Ermüdungserscheinungen – gemessen anhand des VFQ – während der unterschiedlichen Versuchsdurchführungen

Die unterschiedlichen Versuchsdurchführungen bewirken demnach, dass die Datenbrillen-Nutzung im Vergleich zu einer papierbasierten Anwendung verstärkte Symptome hervorruft. Dieser Sachverhalt wird am Beispiel der sprachbasierten Blickpositionieraufgabe (siehe Abb. 8.39) auch durch die Items „Trockene Augen“ ($MD_{PI} = 2,5$, $MD_{HL} = 5$, $z = -2,000$, $p = 0,046$, $r = 0,577$) und „Gereizte Augen“ ($MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 10$, $z = -1,997$, $p = 0,046$, $r = 0,576$) bestätigt. Mit fortschreitender Versuchsdauer empfanden die Probanden zudem, dass ihre Augen zunehmend schwerer wurden ($MD_{PI} = 10$, $MD_{HL} = 20$, $z = -2,273$, $p = 0,023$, $r = 0,656$). Weiterhin konnte insbesondere zum Ende des Experiments ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der erlebten Kopfschmerzen erfasst werden, die einer moderaten Beanspruchung zugeordnet wurden ($MD_{PI} = 7,5$, $MD_{HL} = 9,5$, $z = -2,207$, $p = 0,027$, $r = 0,637$).

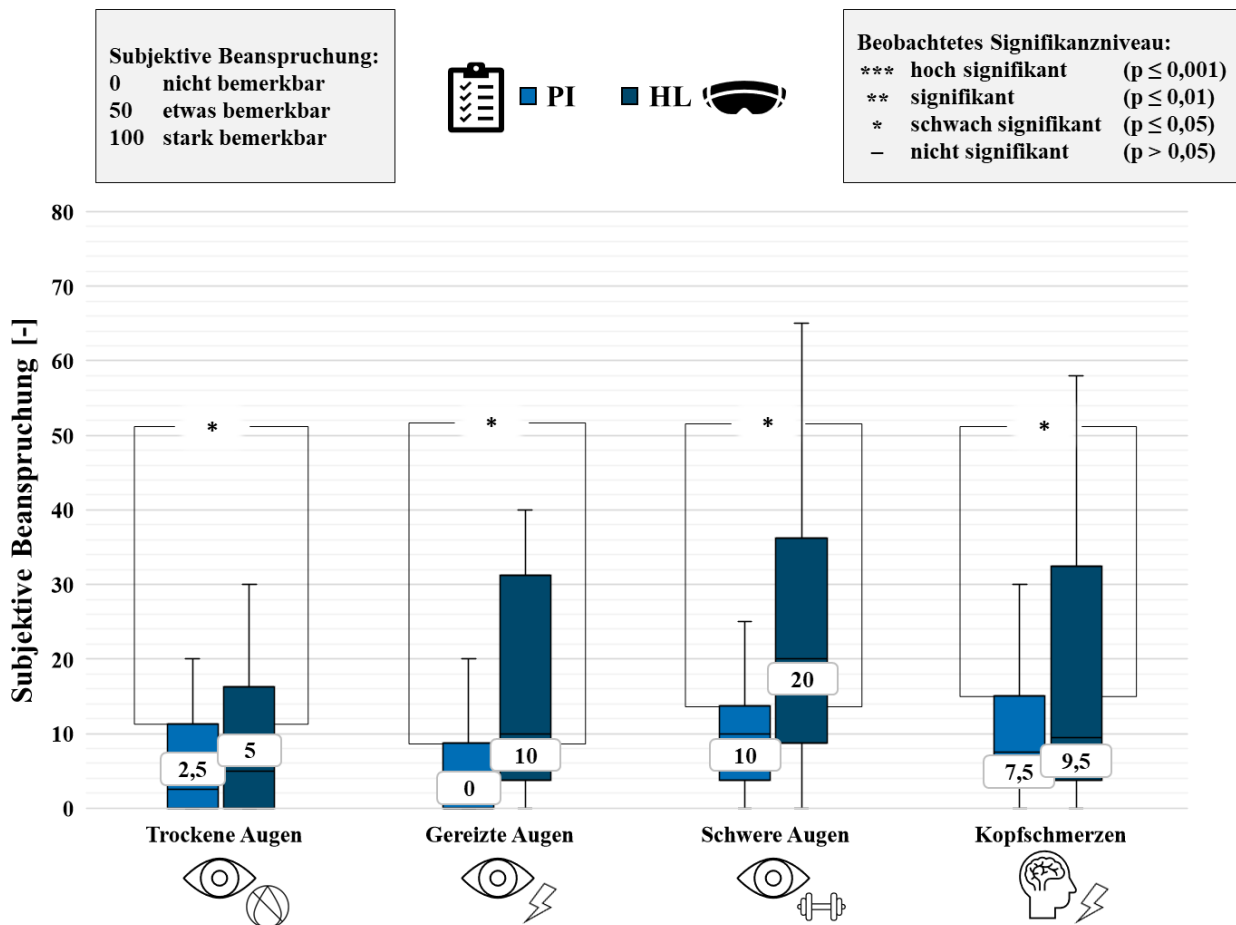





Abb. 8.39: Erlebte Symptomerscheinungen hinsichtlich trockener, gereizter und schwerer Augen sowie Kopfschmerzen – gemessen anhand des VFQ – während der sprachbasierten Blickpositionieraufgabe

8.5.2.5 Abschlussbefragung

Die deskriptiven Analyseergebnisse der Abschlussbefragung sind Abbildung 8.40 und Abbildung 8.41 zu entnehmen. Die Bearbeitung der Montageaufgabe beurteilten die Probanden mithilfe der Papierinstruktion als „gut“ ($M = 2,3 \pm 1,0$) und mit der HoloLens-Unterstützung als „gut“ bis „sehr gut“ ($M = 3,2 \pm 0,8$). Lediglich *VP12* gab an, dass durch den Wechsel der unterschiedlichen Montagepositionen einzelne zu verbauende Teile am vorherigen Montagetisch vergessen bzw. liegen gelassen werden konnten.

Ein weniger eindeutiges Ergebnis, aber dennoch eine für „gut“ (PI: $M = 2,1 \pm 0,9$; HL: $M = 2,2 \pm 0,9$) befundene Einschätzung, wurde bei der Darstellung der Instruktionen respektive der Sichtbarkeit der Anweisungen verzeichnet. Acht Probanden gaben im Zuge der HoloLens-Anwendung an, dass Anweisungen bei starken seitlichen Kopfbewegungen schlecht bzw. nur unscharf zu erkennen waren. Die deskriptive Statistik zeigt jedoch, dass der Informationsgehalt der Anweisung gegenüber der papierbasierten Anwendung durch die Anzeigequalität der HoloLens

nicht eingeübt wurde. Ein Proband (*VP11*) bemerkte zusätzlich, dass die Bodenposition schwer anzuvisieren war. *VP09* hatte außerdem Schwierigkeiten mit der aus seiner Sicht geringen Kontrastdarstellung der HoloLens.

		Beurteilung der Versuchsaufgabe								
										
		sehr schlecht						sehr gut		
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Papierinstruktion							+2,3 ($\pm 1,0$)			
HoloLens							+3,2 ($\pm 0,8$)			




		Beurteilung der Instruktionsdarstellung								
										
		sehr schlecht						sehr gut		
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Papierinstruktion							+2,1 ($\pm 0,9$)			
HoloLens							+2,2 ($\pm 0,9$)			

Abb. 8.40: Subjektive Empfindung zur Beurteilung der Versuchsaufgabe und der Instruktionsdarstellung im Vergleich der unterschiedlichen Durchführungarten im Zuge der Versuchsdurchführung von Teilstudie 1

Die Beurteilung der Trageeigenschaften des Kopfträgers fiel am schlechtesten aus. Im Mittel wurden sie mit $-0,5 (\pm 2,3)$ zwar noch annähernd neutral, aber mit einer negativen Tendenz bewertet. Fünf Probanden gaben an, dass an den (harten) Auflageflächen Druckstellen entstanden sind. Besonders betroffen ist hiervon der Nasenbügel. Ein Proband (*VP08*) beklagte eine verstärkte Wärmeentwicklung im Kopfbereich. *VP12* war der Ansicht, der Kopfträger wirkt instabil.

Die Versuchsbedingungen bzw. -umstände wurden für „gut“ bis „sehr gut“ ($M = 3,3 \pm 1,0$) befunden. Obwohl drei Viertel der Probanden keine Erfahrungen mit der HoloLens oder vergleichbaren Geräten aufweisen konnten, wurde der Umgang mit dem Unterstützungssystem ebenfalls als „gut“ bis „sehr gut“ ($M = 3,3 \pm 0,7$) beurteilt. *VP10* bestätigte dieses Ergebnis: „Nach einer

gewissen Eingewöhnung kam ich ganz gut damit [mit der HoloLens] zurecht. Man muss sich aber schon konzentrieren, um alles richtig zu machen“. Lediglich Proband Nr. 12 gab anfängliche Koordinations- und daraus resultierende Interaktionsschwierigkeiten mit der HoloLens an.

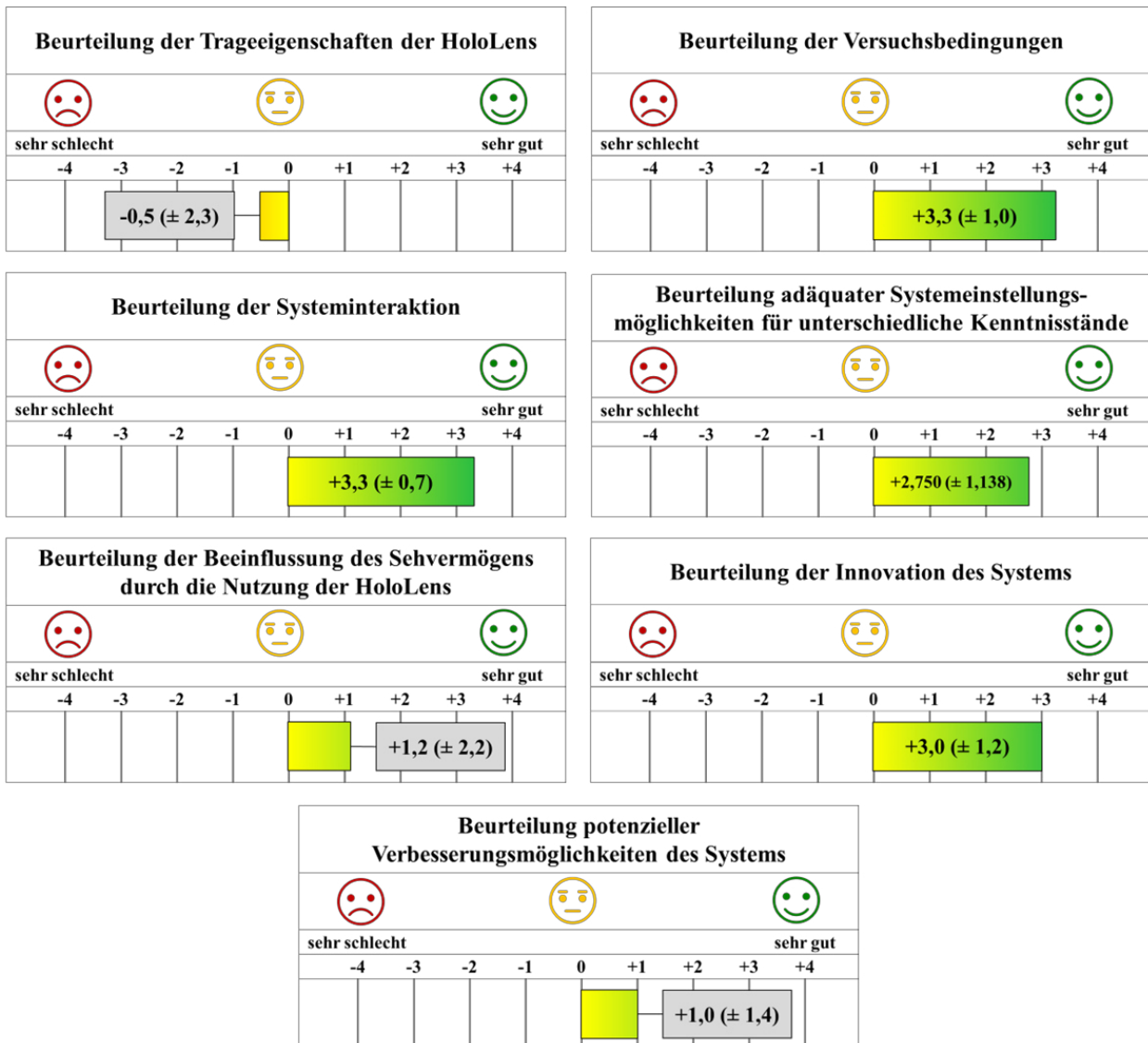


Abb. 8.41: Subjektive Empfindung weiterer unterschiedlicher Beurteilungskriterien im Zuge der Versuchsdurchführung von Teilstudie 1

Die Frage, ob eine adäquate Einstellung des Systems für unterschiedliche (technische) Kenntnisstände vorhanden sei, wurde durchschnittlich mit $2,8 (\pm 1,1)$, d. h. „gut“ bewertet. Während einige Probanden behaupteten, dass sich der Nutzer sehr schnell an das System gewöhnt und es relativ einfach zu bedienen sei (z. B. *VP02*, *VP07*), befürchteten andere, dass weniger technikversierte Personen Bedienungsprobleme erfahren (z. B. *VP10*, *VP12*).

Die Hälfte des Probandenkollektivs merkte an, dass ihr Sehvermögen während der Nutzung der HoloLens negativ beeinträchtigt wurde. Allerdings gaben die restlichen sechs Probanden an, dass

sich ihre Sehleistung nach einer kurzen Pause normalisiert hat und nicht länger beeinträchtigt war. Diese Erkenntnisse spiegeln sich auch in der im Durchschnitt tendenziell „positiv neutralen“ Bewertung von $1,2 (\pm 2,2)$ wider.

Die Innovation der Technik bzw. des Systems wurde für „gut“ bis „sehr gut“ ($M = 3,0 \pm 1,2$) befunden. Alle Probanden stellten trotz des innovativen Charakters der Datenbrille fest, dass der Entwicklungsstand der HoloLens der ersten Generation nicht ausgereift ist und Verbesserungspotenziale bestehen ($M = 1,0 \pm 1,4$), z. B. hinsichtlich der konstruktiven (Gewichtsreduzierung, Erhöhung des Tragekomforts und Eignung für Brillenträger) und anwendungsorientierten (vergrößertes Sichtfeld, verbesserte Grafik und prozesssicherere Interaktion) Gestaltung. Die Probanden konnten sich weiterhin vorstellen, das System neben Rüst- und Montageprozessen auch in den Segmenten „Logistik“, „Simulation“, „Medizintechnik“, „Kommunikation“ respektive „Remote“ oder „Unterhaltung“ einzusetzen.

8.6 Teilstudie 2 („HoloErgo 2.0“) - Evaluierung von physischen und psychischen Beanspruchungsindikatoren sowie Leistungsparametern bei der Anwendung eines AR-basierten Head-Mounted Displays im Rahmen des Rüstvorgangs einer Rotationszugbiegemaschine

Die erste Teilstudie beinhaltete überwiegend statische und einfache Versuchsanteile, die vornehmlich der Beurteilung eines unmittelbaren physischen und psychischen Einflusses der HoloLens auf den Nutzer geschuldet war. Im Rahmen der zweiten Teilstudie sollte nun evaluiert werden, inwieweit dynamische Aufgaben in einem realitätsnahen Umfeld zu entsprechenden Beanspruchungen der Anwender führen können. Die bereits in Teilstudie 1 genutzten objektiven und subjektiven Messmethoden wurden zwecks Vergleichbarkeit auch in der Folgestudie herangezogen. Durch den industriellen Hintergrund des Forschungsthemas wurden in Ergänzung zur vorherigen Studie zusätzlich Rüstzeiten und Montagefehler protokolliert und ausgewertet.

8.6.1 Objektive Beanspruchung

Neben der Erfassung der elektromyographischen Aktivität des m. sternocleidomastoideus und des m. trapezius pars descendens wurden erneut Wärmebilder des Kopfbereiches aufgenommen. Dadurch konnten objektive Daten zur physischen Beanspruchung durch die Anwendung der HoloLens im fixierten (HL_f) und variablen Fenstermodus (HL_v) im Vergleich zur Durchführung des Rüstprozesses mithilfe einer Papier-Instruktion (PI) in zwei Versuchsabschnitten (VA) gewonnen werden.

8.6.1.1 *Elektromyographische Aktivitäten der Schulter-Nacken-Muskulatur*

Die Ergebnisse der OEMG-Messungen zeigen im Gegensatz zur ersten Teilstudie auf, dass der überwiegende Teil der Muskelgruppen durch die Nutzung der HoloLens im Vergleich zur Anwendung mit einer papierbasierten Montagehilfe tatsächlich geringfügiger aktiviert wird. Insgesamt nehmen die Werte ein geringfügiges bis moderates Beanspruchungslevel ein, das sich durch die in Kapitel 8.4 beschriebenen Rüsttätigkeiten in Form von Schraubvorgängen, logistischen Tätigkeiten und einfachen Steckverbindungen zusammensetzt. Ein spezifischer Bezug der muskulären Aktivität zu den jeweiligen Rüstschritten erübrigt sich demnach. Die nachfolgend aufgeführte Ergebnisdarstellung ist derart strukturiert, dass zunächst der Einfluss des AR-Systems auf die Muskelbeanspruchung beschrieben wird. Im Anschluss wird aufgezeigt, inwieweit sich die unterschiedlichen Modi des Unterstützungssystems auf die muskuläre Aktivität der Probanden ausgewirkt haben. Außerdem erfolgt abschließend eine Einschätzung hinsichtlich des Einflusses der spezifischen „Rüsterfahrung“ auf die muskuläre Beanspruchung im Schulter-Nacken-Bereich.

Anhand des Kolmogorov-Smirnov-Tests wird ersichtlich, dass die Datenreihen, wie z. B. der obere linksseitige m. trapezius pars descendens ($KS_{PI,VA1} = 0,162$, $p_{PI,VA1} = 0,102$), der rechtsseitige m. sternocleidomastoideus ($KS_{HLf,VA1} = 0,135$, $p_{PI,VA1} > 0,200$) und der untere linksseitige m. trapezius pars descendens ($KS_{HLv,VA2} = 0,147$, $p_{HLv,VA2} = 0,198$), mehrheitlich einer Normalverteilung unterliegen und entsprechend der t-Test für abhängige bzw. verbundene Stichproben verwendet werden kann.

Einfluss der HoloLens auf die Muskelbeanspruchung

Die OEMG-Messungen zeigen bei einer globalen, deskriptiven Betrachtung über sämtliche Rüstprozesse, dass für jede Muskelgruppe ein Unterschied zwischen der Versuchsdurchführung mit und ohne HoloLens vorliegt (siehe Abb. 8.42). Die Muskelbeanspruchung des m. trapezius pars descendens des oberen linksseitigen ($M_{PI} = 8,0 \pm 4,5$, $M_{HLf} = 6,1 \pm 3,6$, $M_{HLv} = 5,9 \pm 3,5$), des oberen rechtsseitigen ($M_{PI} = 7,7 \pm 4,6$, $M_{HLf} = 7,0 \pm 4,8$, $M_{HLv} = 6,6 \pm 4,3$) und des unteren linksseitigen ($M_{PI} = 5,3 \pm 4,1$, $M_{HLf} = 4,2 \pm 3,5$, $M_{HLv} = 4,3 \pm 3,3$) Teils ist bei der Nutzung der Papier-Instruktion im Vergleich zur HoloLens-Anwendung im fixierten und variablen Fenstermodus höher. Diese Erkenntnis kann auch für den m. sternocleidomastoideus (linksseitig: $M_{PI} = 2,0 \pm 1,9$, $M_{HLf} = 1,4 \pm 1,2$, $M_{HLv} = 1,4 \pm 1,3$; rechtsseitig: $M_{PI} = 2,1 \pm 1,4$, $M_{HLf} = 1,6 \pm 1,2$, $M_{HLv} = 1,5 \pm 1,2$) gewonnen werden. Lediglich die Muskelbeanspruchung des unteren rechtsseitigen m. trapezius pars descendens ($M_{PI} = 4,6 \pm 3,7$, $M_{HLf} = 6,0 \pm 5,1$, $M_{HLv} = 5,7 \pm 4,6$) ist innerhalb der Versuchsdurchläufe während Nutzung der HoloLens höher als

ohne deren Anwendung. Diese globale Betrachtungsweise liefert aufgrund der über sämtliche Versuchsdurchführungen gemittelten Messwerte keineswegs eine aussagekräftige Ergebnisdarstellung. Daher wurden die einzelnen Muskelstellen in Bezug auf die einzelnen Durchführungsmodi und den jeweiligen Rüstprozess granular analysiert.

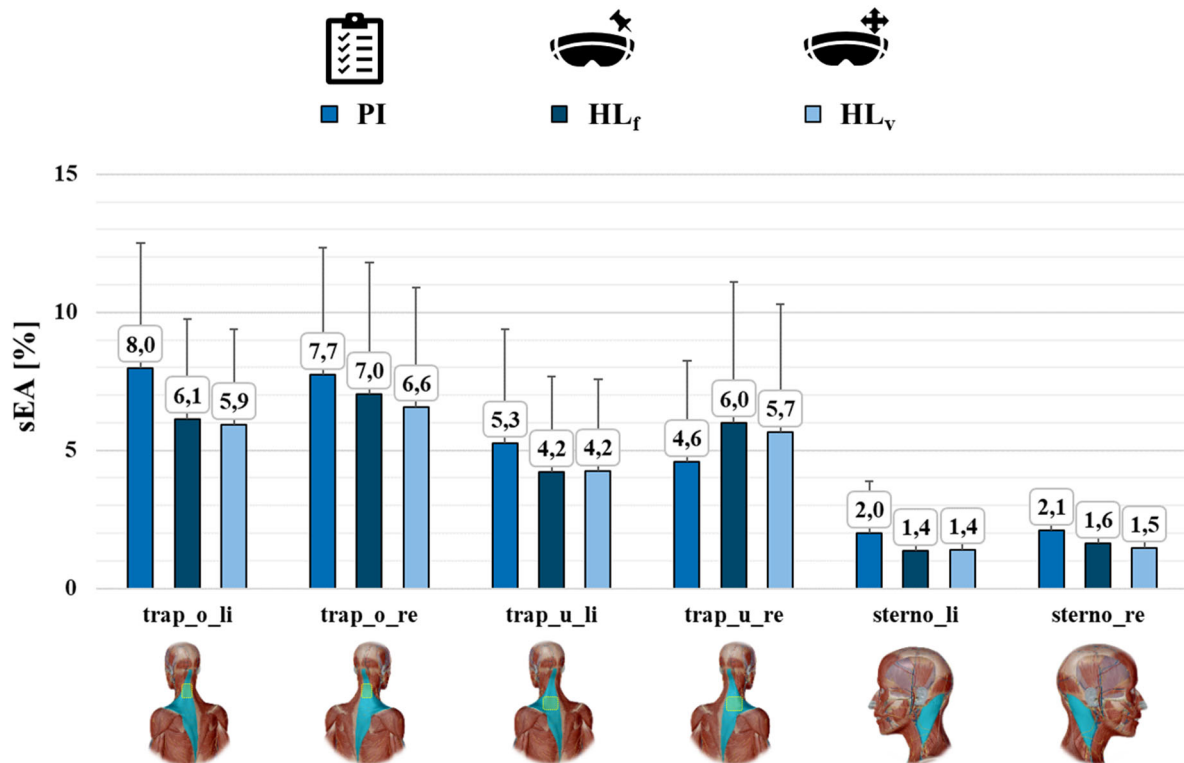


Abb. 8.42: Deskriptive bzw. globale Darstellung der standardisierten elektromyographischen Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien über sämtliche Rüstvorgänge

Für sämtliche Muskelgruppen sind signifikante und mit mindestens mittelgroßen Effekten versehene Unterschiede zwischen der Nutzung der Papier-Instruktion und der HoloLens-Anwendung im fixierten Fenstermodus festzustellen. Das beschriebene globale Ergebnisbild kann auch für diesen Vergleich wiedergegeben werden. Die normalisierte elektromyographische Aktivität ist bspw. im Zuge des ersten Rüstabschnitts für die oberen m. trapezii pars descendens (linksseitig: $M_{PI} = 7,8 \pm 4,5 \%$, $M_{HLf} = 5,8 \pm 3,4 \%$, $t = 6,191$, $p = 0,006$, $d = 1,264$; rechtsseitig: $M_{PI} = 7,7 \pm 4,5 \%$, $M_{HLf} = 6,7 \pm 4,7 \%$, $t = 3,324$, $p = 0,018$, $d = 0,679$) und den unteren linksseitigen m. trapezius pars descendens ($M_{PI} = 4,8 \pm 3,9 \%$, $M_{HLf} = 3,8 \pm 3,4 \%$, $t = 3,385$, $p = 0,01$, $d = 0,691$) sowie für die m. sternocleidomastoidei (linksseitig: $M_{PI} = 2,0 \pm 2,0 \%$, $M_{HLf} = 1,2 \pm 1,0 \%$, $t = 3,082$, $p = 0,006$, $d = 0,883$; rechtsseitig: $M_{PI} = 2,0 \pm 1,4 \%$, $M_{HLf} = 1,5 \pm 1,2 \%$, $t = 4,326$, $p = 0,018$, $d = 0,679$) mit der HoloLens im fixierten Fenstermodus signifikant niedriger als bei der Versuchsdurchführung ohne Datenbrille. Einzig der rechte Teil des unteren m. trapezius pars descendens ($M_{PI} = 4,4 \pm 3,7 \%$, $M_{HLf} = 5,5 \pm 4,9 \%$, $t = -2,656$, $p = 0,042$, $d = 0,542$) wird stärker aktiviert, wie anhand der Abbildung 8.43 grafisch verdeutlicht

werden kann. Der variable Fenstermodus der Datenbrille weist im Vergleich zum Rüstvorgang ohne AR-basiertes Unterstützungssystem ebenfalls signifikante und effektreiche Mittelwertsunterschiede auf. In Bezug auf den zweiten Rüstabschnitt zeigt sich erneut, dass lediglich der untere rechtsseitige m. trapezius pars descendens im Zuge der HoloLens-Ausführung im Vergleich zur papierbasierten Durchführung stärker beansprucht wird ($M_{PI} = 4,6 \pm 3,7 \%$, $M_{HLv} = 5,8 \pm 4,6 \%$, $t = -3,867$, $p = 0,006$, $d = 0,789$). Für die restlichen Muskelgruppen wurden nachfolgend aufgeführte Werte erfasst (siehe Abb. 8.44):

- m. trapezius pars descendens, oben links: $M_{PI} = 8,2 \pm 4,6 \%$, $M_{HLv} = 6,4 \pm 4,0 \%$,
 $t = 5,793$, $p = 0,006$, $d = 1,182$
- m. trapezius pars descendens, oben rechts: $M_{PI} = 7,8 \pm 4,7 \%$, $M_{HLv} = 6,9 \pm 4,6 \%$,
 $t = 3,217$, $p = 0,020$, $d = 0,657$
- m. trapezius pars descendens, unten links: $M_{PI} = 5,2 \pm 4,1 \%$, $M_{HLv} = 4,3 \pm 3,4 \%$,
 $t = 3,527$, $p = 0,010$, $d = 0,720$
- m. sternocleidomastoideus, links: $M_{PI} = 2,0 \pm 1,8 \%$, $M_{HLv} = 1,5 \pm 1,3 \%$,
 $t = 3,922$, $p = 0,006$, $d = 0,801$
- m. sternocleidomastoideus, rechts: $M_{PI} = 2,2 \pm 1,4 \%$, $M_{HLv} = 1,5 \pm 1,3 \%$,
 $t = 5,793$, $p = 0,006$, $d = 1,182$

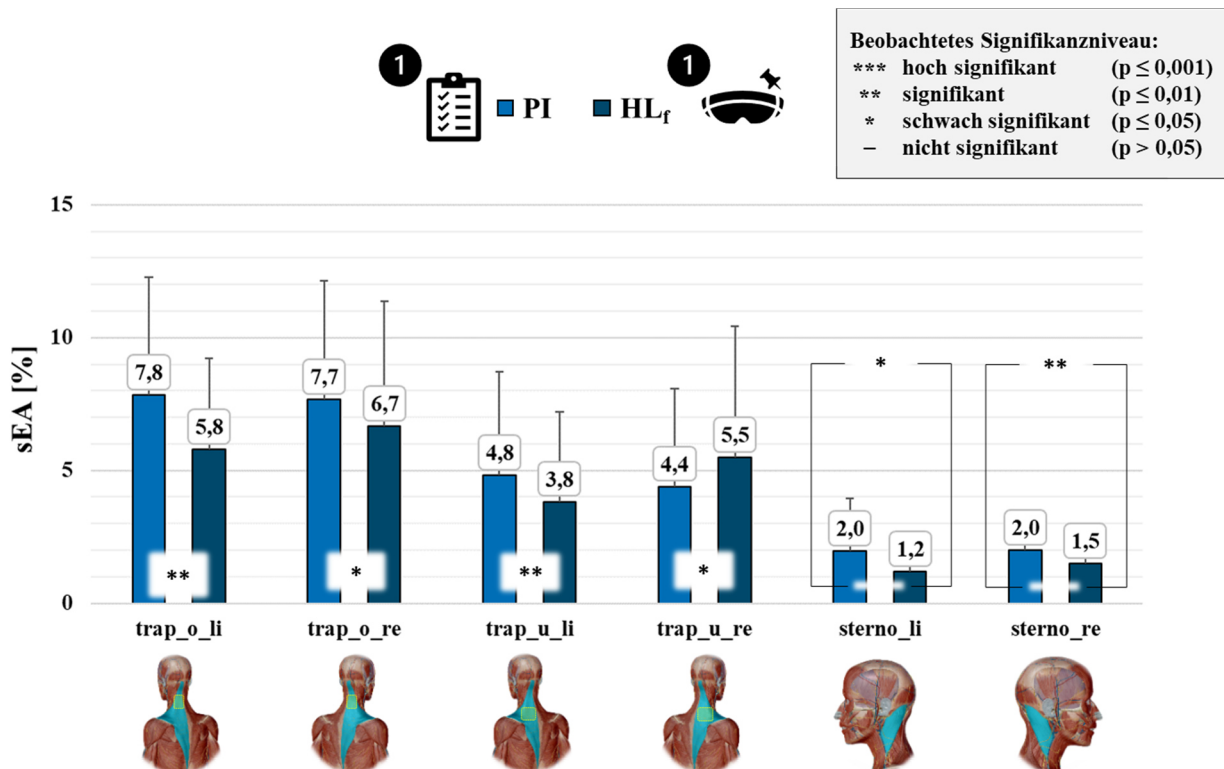


Abb. 8.43: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während des ersten Versuchsabschnittes im Vergleich der Rüstdurchführung mithilfe der Papierinstruktion und der örtlich gebundenen HoloLens-Anwendung

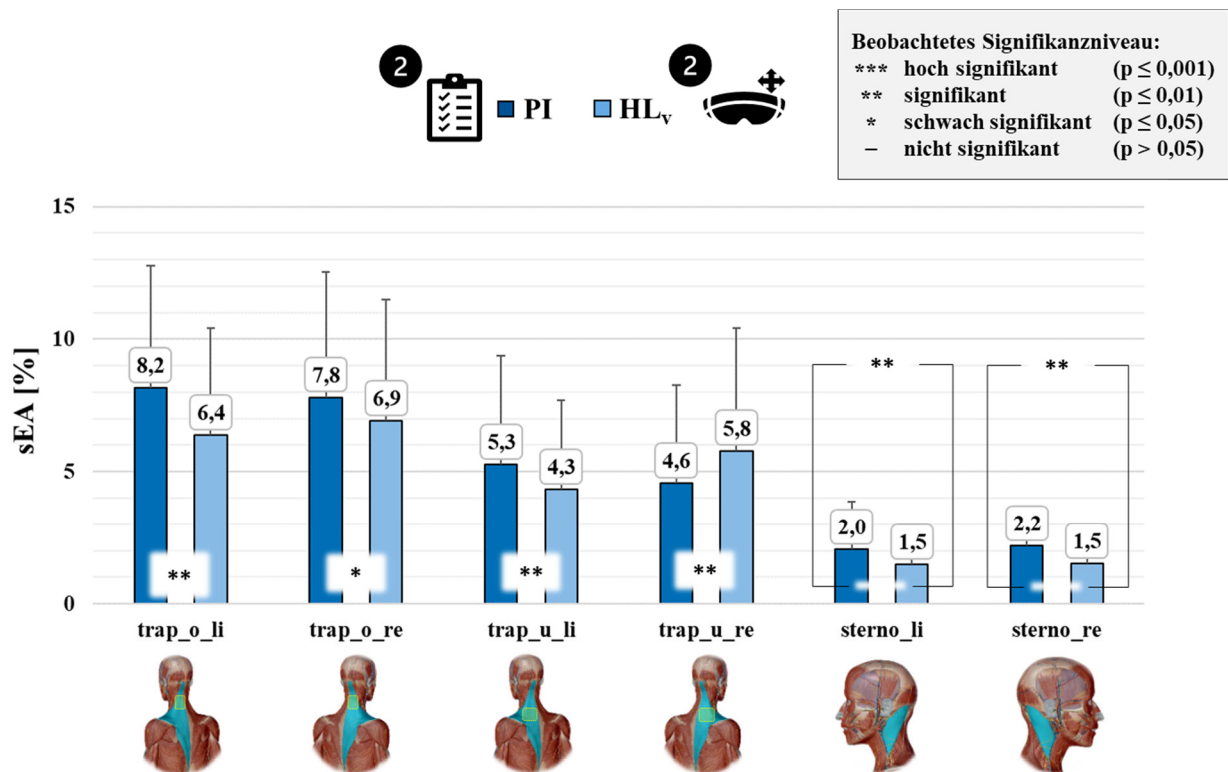


Abb. 8.44: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während des zweiten Versuchsabschnittes im Vergleich der Rüstdurchführung mithilfe der Papierinstruktion und der variablen HoloLens-Anwendung

Einfluss der unterschiedlichen Modi der HoloLens auf die Muskelbeanspruchung

Ein Vergleich der örtlichen Fixierung der holografischen Inhalte mit der dem Blickfeld folgenden Hilfestellung zeigt, dass signifikante Unterschiede mit unterschiedlichen Effektstärken zwischen den beiden Durchführungsmodi variieren – sowohl in Bezug auf den ersten als auch auf den zweiten Versuchsabschnitt.

Für die rechtsseitigen Muskelgruppen lassen sich im Zuge der zweiten Ausführung insbesondere für den Trapez-Muskel (oben: $M_{HLf} = 7,4 \pm 4,9 \%$, $M_{HLv} = 6,9 \pm 4,6 \%$, $t = 2,656$, $p = 0,030$, $d = 0,542$; unten: $M_{HLf} = 6,5 \pm 5,3 \%$, $M_{HLv} = 5,8 \pm 4,6 \%$, $t = 3,339$, $p = 0,002$, $d = 0,682$) signifikante und effektreiche Differenzen erkennen (siehe Abb. 8.45). Auch der Halsmuskel ($M_{HLf} = 1,8 \pm 1,2 \%$, $M_{HLv} = 1,5 \pm 1,3 \%$, $t = 2,378$, $p = 0,078$, $d = 0,485$) lässt einen marginalen Mittelwertsunterschied erkennen, wenngleich dieser nicht signifikant ist. Die jeweils linksseitigen Muskelstellen der m. trapezii pars descendens (oben: $M_{HLf} = 6,5 \pm 3,8 \%$, $M_{HLv} = 6,4 \pm 4,0 \%$, $t = 0,631$, $p = 0,534$, $d = 0,129$; unten: $M_{HLf} = 4,6 \pm 3,6 \%$, $M_{HLv} = 4,3 \pm 3,4 \%$, $t = 1,492$, $p = 0,298$, $d = 0,305$) und des m. sternocleidomastoideus ($M_{HLf} = 1,5 \pm 1,5 \%$,

$M_{HL_v} = 1,5 \pm 1,3 \%$, $t = 0,587$, $p = 0,814$, $d = 0,120$) weisen durchweg keine signifikanten Unterschiede auf.

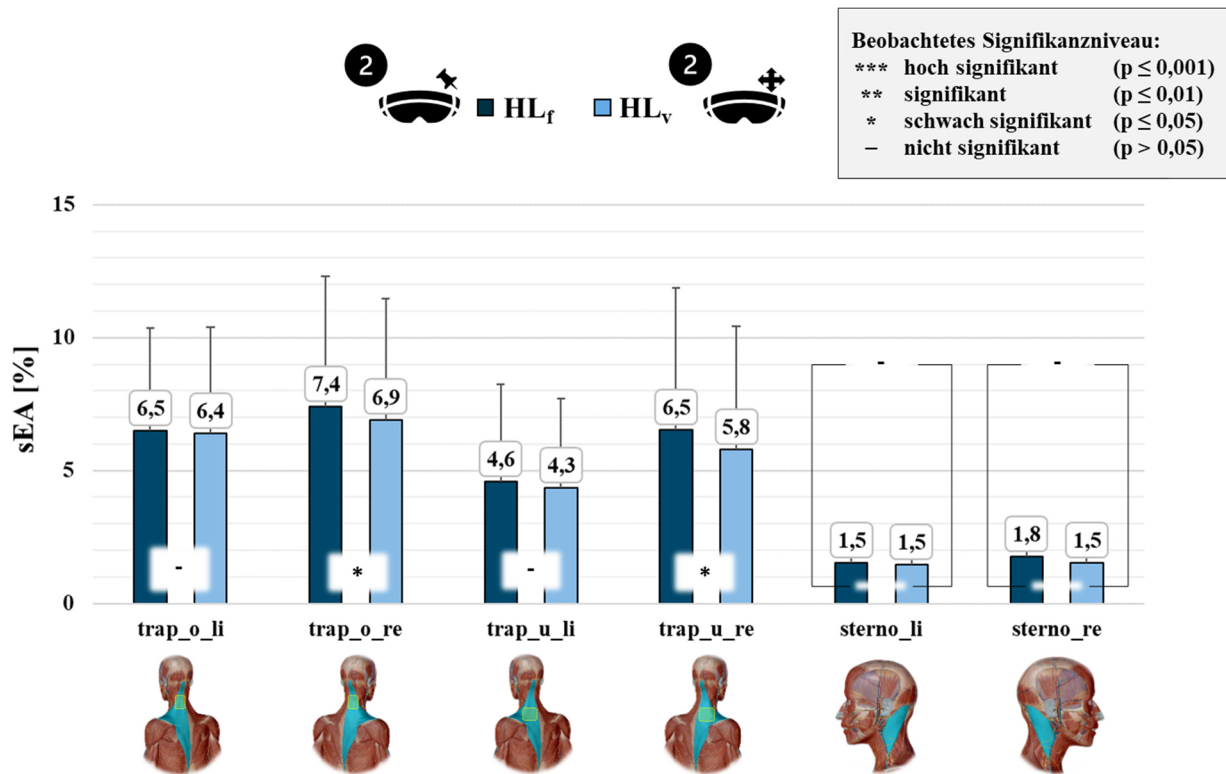


Abb. 8.45: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während des zweiten Versuchsabschnittes im Vergleich der Rüstdurchführung mithilfe der fixierten und der variablen HoloLens-Anwendung

Einfluss der „Rüsterfahrung“ auf die Muskelbeanspruchung

Inwieweit sich wiederholende Arbeitstätigkeiten und etwaige damit einhergehende fortschreitende Erfahrungswerte der Probanden hinsichtlich des Rüstvorgangs und des Umgangs mit der HoloLens auf die muskuläre Beanspruchung im Schulter-Nacken-Bereich auswirken, wird im Folgenden dargestellt.

Im Zuge der Durchführung des Rüstvorgangs mithilfe des fixierten Fenstermodus der HoloLens konnten im Vergleich der beiden Versuchsabschnitte mit Ausnahme des links- ($M_{VA1} = 1,2 \pm 1,0 \%$, $M_{VA2} = 1,5 \pm 1,5 \%$, $t = -2,254$, $p = 0,136$, $d = 0,460$) und rechtsseitigen Sternocleidomastoideus-Muskels ($M_{VA1} = 1,5 \pm 1,2 \%$, $M_{VA2} = 1,8 \pm 1,2 \%$, $t = -2,667$, $p = 0,056$, $d = 0,544$) signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die signifikanten und mit einem mindestens mittelgroßen Effekt behafteten Mittelwertvergleiche ergaben folgende Ergebnisse (siehe Abb. 8.46):

- m. trapezius pars descendens, oben links: $M_{VA1} = 5,8 \pm 3,4 \%$, $M_{VA2} = 6,5 \pm 3,8 \%$,
 $t = -4,299$, $p = 0,006$, $d = 0,877$
- m. trapezius pars descendens, oben rechts: $M_{VA1} = 6,7 \pm 4,7 \%$, $M_{VA2} = 7,4 \pm 4,9 \%$,
 $t = -2,829$, $p = 0,030$, $d = 0,577$
- m. trapezius pars descendens, unten links: $M_{VA1} = 3,8 \pm 3,4 \%$, $M_{VA2} = 4,6 \pm 3,6 \%$,
 $t = -4,277$, $p = 0,006$, $d = 0,873$
- m. trapezius pars descendens, unten rechts: $M_{VA1} = 5,5 \pm 4,9 \%$, $M_{VA2} = 6,5 \pm 5,3 \%$,
 $t = -3,968$, $p = 0,006$, $d = 0,810$

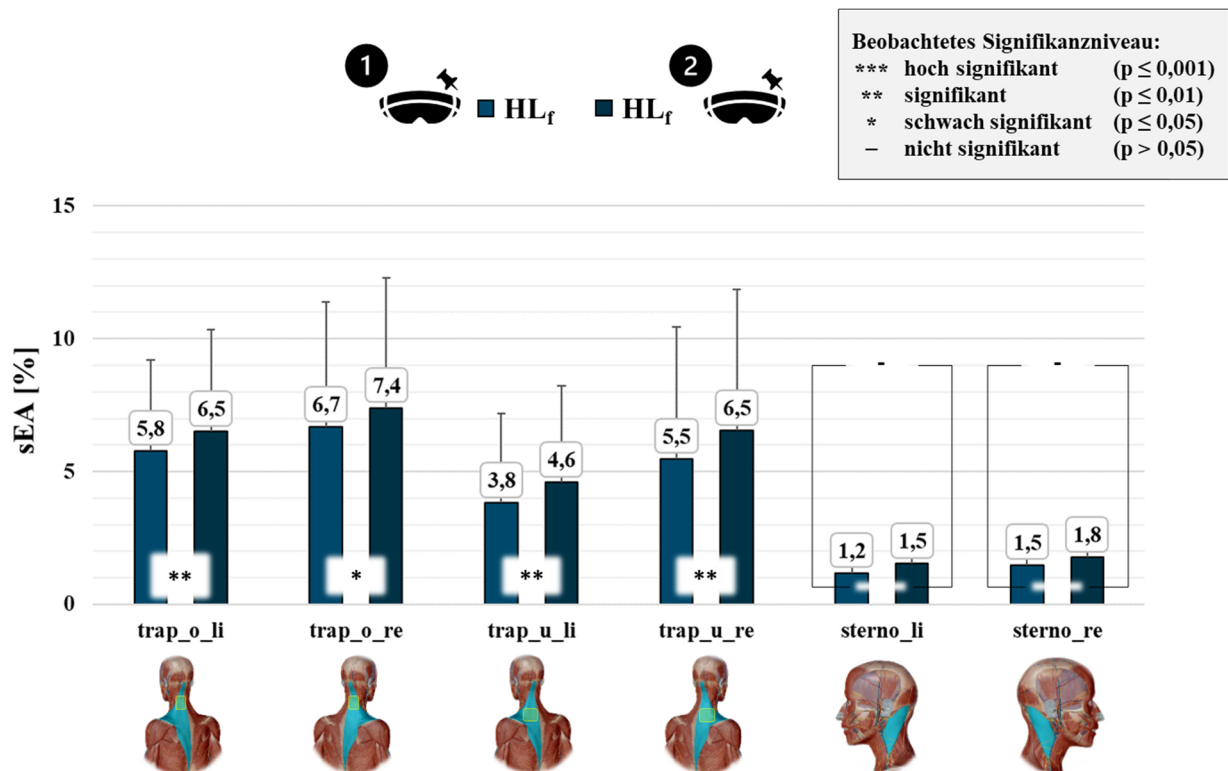


Abb. 8.46: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während des ersten und zweiten Versuchsabschnittes der Rüstdurchführung mithilfe der fixierten HoloLens-Anwendung

Hinsichtlich der variablen Instruktionsausrichtung der HoloLens erhöhte sich die muskuläre Beanspruchung erneut nur marginal (siehe Abb. 8.47). Lediglich für die oberen Trapez-Muskeln der linken ($M_{VA1} = 5,5 \pm 3,0 \%$, $M_{VA2} = 6,4 \pm 4,0 \%$, $t = -2,696$, $p = 0,039$, $d = 0,550$) und rechten Seite ($M_{VA1} = 6,2 \pm 4,1 \%$, $M_{VA2} = 6,9 \pm 4,6 \%$, $t = -3,137$, $p = 0,020$, $d = 0,640$) konnten signifikante Mittelwertsunterschiede mit einem mittelstarken Effekt verzeichnet werden. Bei allen anderen Muskelgruppen, d. h. des unteren m. trapezius pars descendens (links: $M_{VA1} = 4,2 \pm 3,4 \%$, $M_{VA2} = 4,3 \pm 3,4 \%$, $t = -1,068$, $p = 0,297$, $d = 0,218$; rechts: $M_{VA1} = 5,5 \pm 4,7 \%$, $M_{VA2} = 5,8 \pm 4,6 \%$, $t = -1,300$, $p = 0,412$, $d = 0,265$) und der m. sternomastocleidoideii (links: $M_{VA1} = 1,3 \pm 1,4 \%$, $M_{VA2} = 1,5 \pm 1,3 \%$, $t = -1,653$, $p = 0,336$, $d = 0,338$; rechts:

$M_{VA1} = 1,4 \pm 1,1 \%$, $M_{VA2} = 1,5 \pm 1,3 \%$, $t = -1,131$, $p = 0,270$, $d = 0,231$) ist ein Anstieg des Mittelwerts zwar deskriptiv zu beobachten, dieser ist jedoch statistisch nicht signifikant.

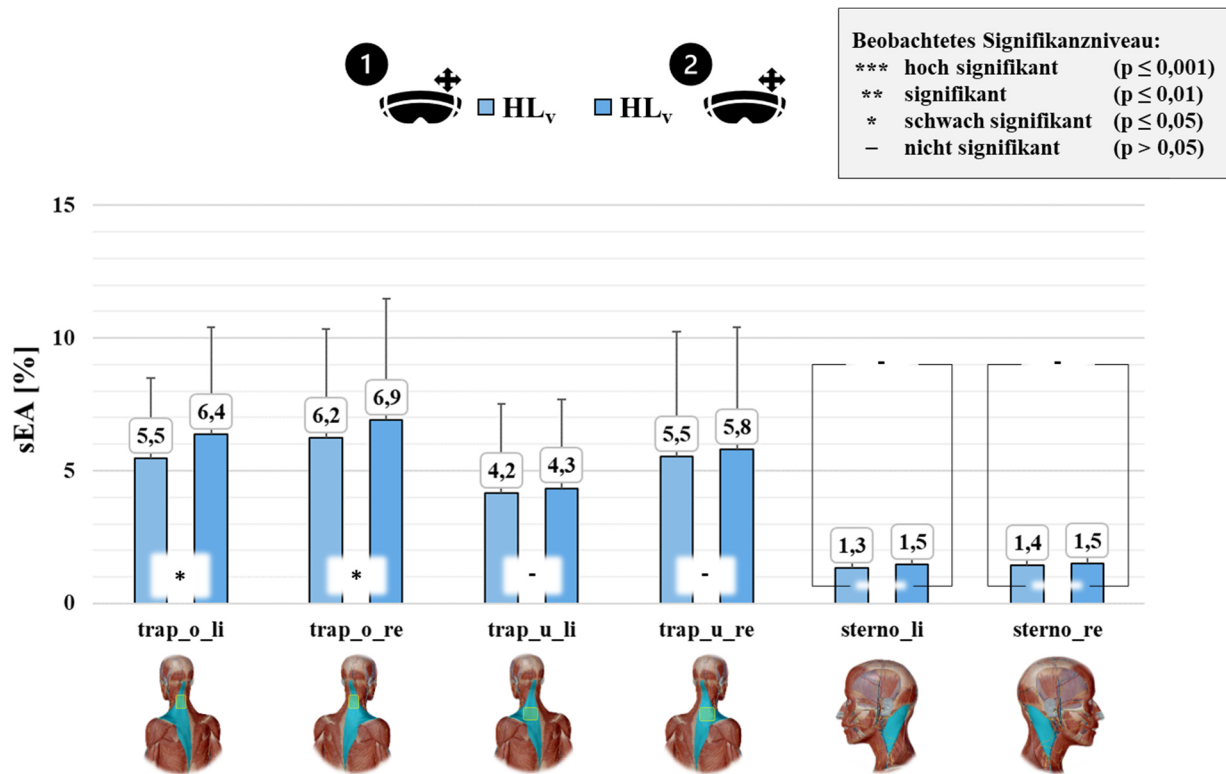


Abb. 8.47: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während des ersten und zweiten Versuchsabschnittes der Rüstdurchführung mithilfe der variablen HoloLens-Anwendung

Um dahingehend Rückschlüsse ziehen zu können, dass die im fixierten und variablen Fenstermodus aufgetretenen Effekte nicht auf einen natürlichen Ermüdungsprozess zwischen dem ersten und zweiten Rüstdurchgang zurückzuführen sind, wurde außerdem untersucht, ob sich entsprechende Auffälligkeiten ebenfalls bei der Versuchsdurchführung ohne Nutzung der HoloLens zeigen (siehe Abb. 8.48). Eine signifikante Steigerung der Muskelaktivität zwischen dem ersten und zweiten Durchgang konnte im Zuge der Versuchsbedingung „Papier-Instruktion“ lediglich für den unteren linksseitigen m. trapezius pars descendens festgestellt werden ($M_{VA1} = 4,8 \pm 3,9 \%$, $M_{VA2} = 5,3 \pm 4,1 \%$, $t = -3,560$, $p = 0,010$, $d = 0,727$). Die elektromyographischen Aktivitäten der übrigen Muskelstellen steigt ohne erkennbare Signifikanzen der Mittelwertsunterschiede marginal an, wie am Beispiel des oberen m. trapezius pars descendens (linksseitig: $M_{VA1} = 7,8 \pm 4,5 \%$, $M_{VA2} = 8,2 \pm 4,6 \%$, $t = -1,877$, $p = 0,146$, $d = 0,383$; rechtsseitig: $M_{VA1} = 7,7 \pm 4,5 \%$, $M_{VA2} = 7,8 \pm 4,7 \%$, $t = -0,766$, $p = 0,452$, $d = 0,156$) deutlich wird.

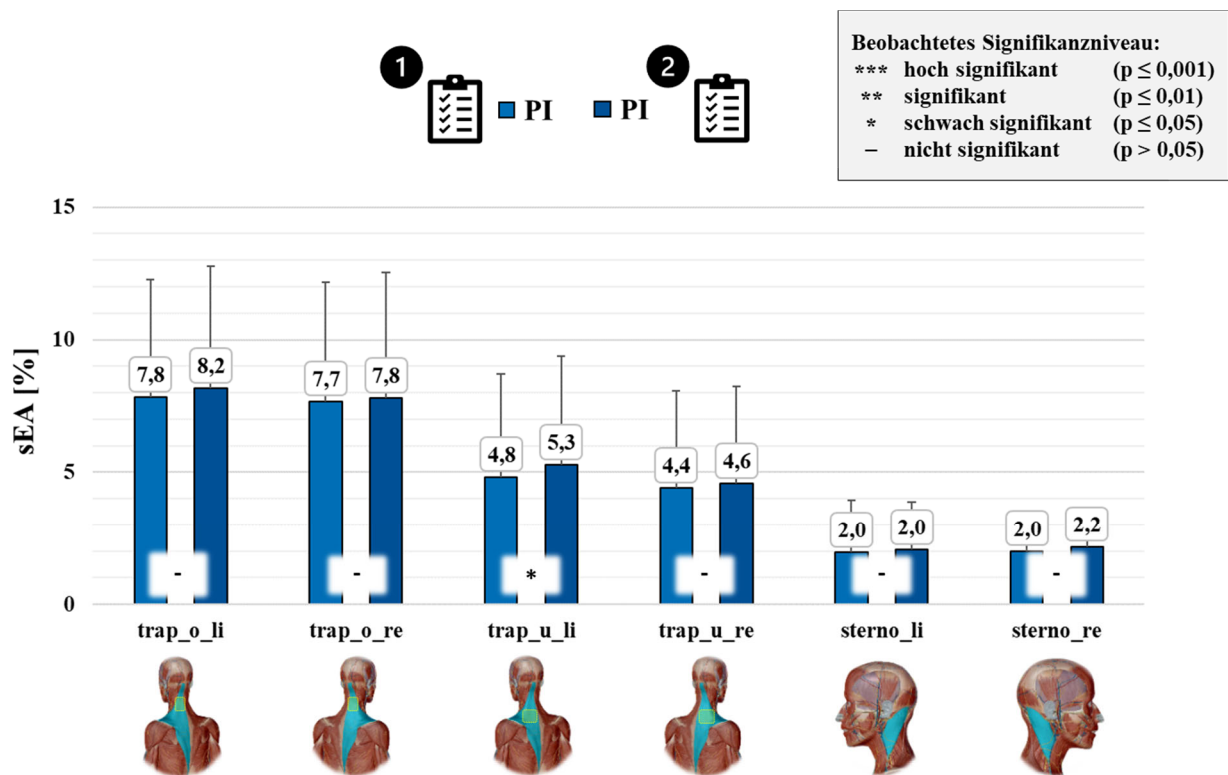


Abb. 8.48: Standardisierte elektromyographische Aktivitätswerte [%] der einzelnen Muskelpartien während des ersten und zweiten Versuchsabschnittes der Rüstdurchführung mithilfe der Papierinstruktion

8.6.1.2 Wärmebildaufnahmen des Kopfbereiches

Eine Analyse der normalverteilten thermografischen Daten der zweiten Teilstudie (z. B. $SW_{PI, V1, Stirn} = 0,939$, $p_{PI, V1, Stirn} = 0,153$; $SW_{HL, V1, Nase} = 0,959$, $p_{HL, V1, Nase} = 0,416$; $SW_{HL, V2, Linke\ Schläfe} = 0,984$, $p_{HL, V2, Linke\ Schläfe} = 0,962$) zeigt, dass die in Teilstudie 1 gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Veränderungen der Hautoberflächentemperatur im Kopfbereich der Nutzer durch die zweite Teilstudie weitgehend bestätigt werden konnten.

Wenngleich das globale Temperaturniveau im Vergleich der beiden Teilstudien auf mindestens 31 °C bis maximal 36 °C fällt, ruft die Anwendung der Datenbrille auch im Zuge der Ausführung von Rüstvorgängen ebenfalls signifikant erhöhte Wärme- bzw. Druckstellen im Kopfbereich hervor, wie am Beispiel des Vergleichs der erstmaligen papierbasierten Rüstdurchführung und der HoloLens-Nutzung durch Abbildung 8.49 messtechnisch und anhand von Abbildung 8.50 visuell dargelegt werden kann.

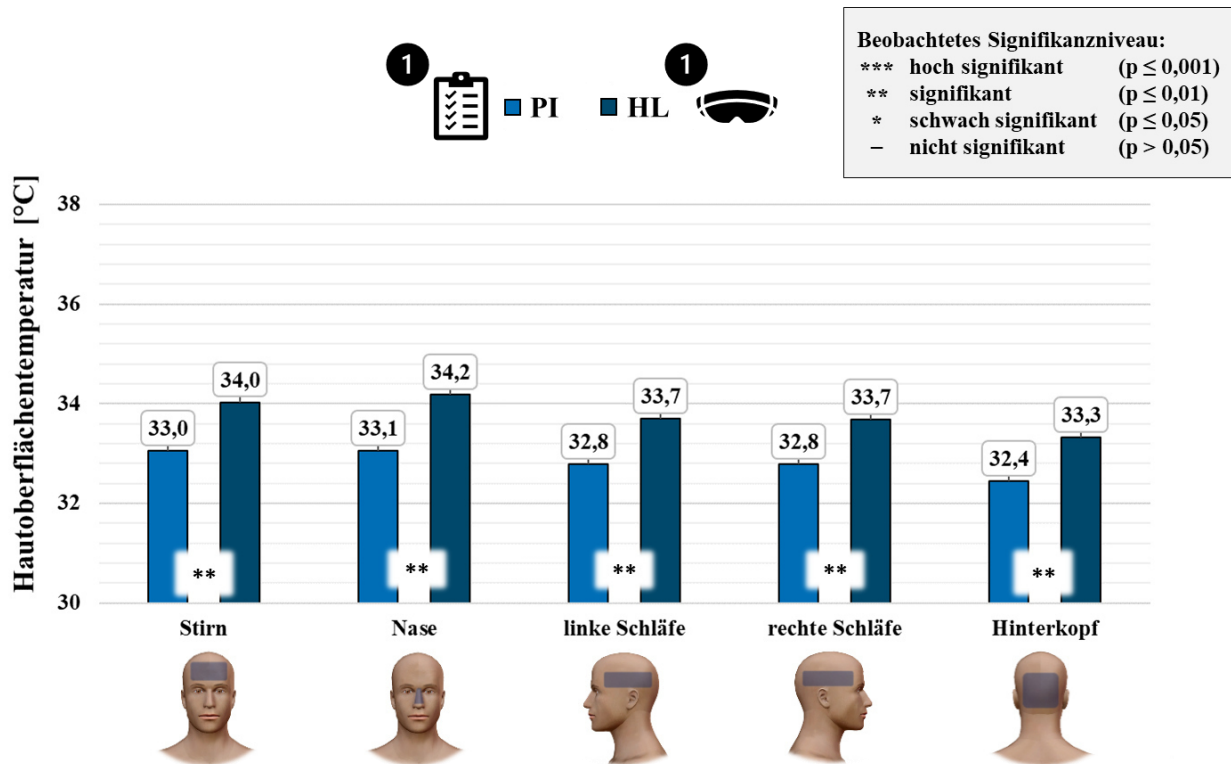


Abb. 8.49: Hautoberflächentemperatur [°C] der Auflagepunkte der Datenbrille im Kopfbereich des Nutzers im Zuge des ersten Rüstabschnittes

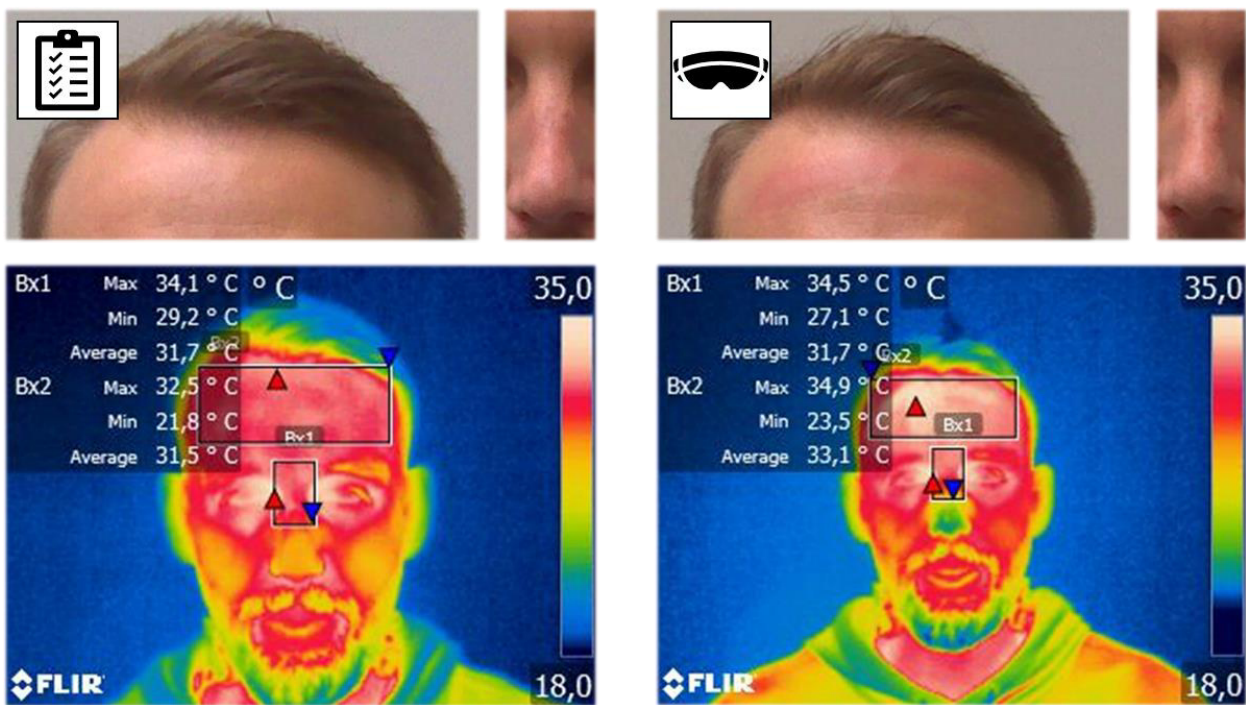


Abb. 8.50: Hautoberflächentemperaturen und etwaige Anzeichen von Durchblutungsstörungen an der Stirn und der Nase ohne (links) und mit Nutzung der Datenbrille (rechts) am Beispiel von VP23

Im Rahmen des ersten Versuchsabschnitts ist der Temperaturunterschied an der Nase am größten ($M_{PI} = 33,1 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,2 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -14,038$, $p < 0,004$, $d = 2,866$), gefolgt von den Mittelwertsunterschieden der Stirn ($M_{PI} = 33,0 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,0 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -9,857$, $p < 0,004$, $d = 2,012$), der links- ($M_{PI} = 32,8 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 33,7 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -8,070$, $p < 0,004$, $d = 1,647$) und rechtsseitigen Schläfe ($M_{PI} = 32,8 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 33,7 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -10,408$, $p < 0,004$, $d = 2,124$) sowie des Hinterkopfes ($M_{PI} = 32,4 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 33,3 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -10,269$, $p < 0,004$, $d = 2,096$). Bei abnehmenden zentralen Tendenzen steigt das Temperaturprofil im Versuchsverlauf erneut leicht an, wie am Beispiel der Nase ($M_{PI} = 33,7 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,4 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -14,537$, $p < 0,004$, $d = 2,967$) und der Stirn ($M_{PI} = 33,6 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL} = 34,2 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -9,405$, $p < 0,004$, $d = 1,920$) zu erkennen ist. Während die thermografischen Messwerte zwischen den einzelnen HoloLens-Anwendung mit maximal $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ nur marginal differieren (z. B. $M_{HL, v1, Stirn} = 34,0 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{HL, v2, Stirn} = 34,2 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -5,412$, $p < 0,004$, $d = 1,105$), ist der Unterschied zwischen den papierbasierten Rüstvorgängen (maximal $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$) größer (z. B. $M_{PI, v1, Nase} = 33,1 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_{PI, v2, Nase} = 33,7 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = -9,103$, $p < 0,004$, $d = 1,858$). Sämtliche Vergleiche sind durch eine hohe Effektstärke charakterisiert.

8.6.2 *Subjektive Beurteilung der Rüstaufgabe*

Die subjektiven Empfindungen der Probanden in Folge der Rüstaufgabe wurden erneut quantitativ durch standardisierte Fragebögen und weitere beanspruchungs- bzw. arbeitsbezogene Fragen erhoben. Außerdem wurde, zusätzlich zu dem Versuchssetting der ersten Teilstudie, ein qualitatives, teil- oder semi-strukturiertes Interview durchgeführt. Aufgrund der umfangreichen (im Schnitt 45-minütigen) Probanden-Gespräche werden im Folgenden nur wesentliche Zitate hervorgehoben, welche die Erkenntnisse der weiteren Befragungsmethoden bestätigen oder entkräften.

8.6.2.1 *Subjektives physisches Beanspruchungserleben*

Nachfolgend werden die subjektiven Empfindungen der Probanden beim Tragen und Nutzen der HoloLens untersucht: zum einen hinsichtlich ihrer muskulären Beanspruchung und zum anderen in Bezug auf die im Kopfbereich empfundene Wärme- bzw. Druckempfindung.

Empfundene muskuläre Beanspruchung

Die Ergebnisse zur subjektiv empfundenen muskulären Beanspruchung zeigen im Vergleich zu den objektiven Daten eine Diskrepanz auf. Die Probanden konstatierten im Zuge der Rüstvorgänge eine verstärkte Beanspruchung in Folge der HoloLens-Nutzung. Die nicht normalverteilten Daten

(z. B. linksseitiger oberer m. trapezius pars descendens: $SW_{PI, V1} = 0,598$, $p_{PI, V1} < 0,001$; $SW_{HLf, V2} = 0,768$, $p_{HLf, V2} < 0,001$) deuten sowohl im ersten als auch im zweiten Versuchsabschnitt auf eine verminderte Beanspruchung sämtlicher Muskelstellen im Zuge der Anwendung der Papiereinstruktion hin. Bereits im ersten Versuchsdurchgang wird die Datenbrillen-Nutzung im Tag-along-Modus als „moderat“ beanspruchend erlebt, während die Durchführung ohne HMD keine muskulären Beeinträchtigungen nach sich zieht. Diese Erkenntnis kann für sämtliche Muskeln, d. h. für die oberen musculus trapezii pars descendens (linksseitig: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -2,530$, $p = 0,055$, $r = 0,516$; rechtsseitig: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -2,496$, $p = 0,065$, $r = 0,509$), die unteren Trapez-Muskeln (linksseitig: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -1,265$, $p = 0,628$, $r = 0,258$; rechtsseitig: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -1,667$, $p = 0,384$, $r = 0,340$) und die m. sternocleidomastoidei (linksseitig: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -2,309$, $p = 0,105$, $r = 0,471$; rechtsseitig: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -2,121$, $p = 0,136$, $r = 0,433$), gleichermaßen gewonnen werden. Die zunächst fehlenden signifikanten Median-Unterschiede sind allerdings im zweiten Rüstabschnitt existent, wie am Beispiel des fixierten Fenstermodus der HoloLens verdeutlicht werden kann (siehe Abb. 8.51):

- Oberer linksseitiger m. trapezius pars descendens: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -2,828$,
 $p = 0,030$, $r = 0,577$
- Oberer rechtsseitiger m. trapezius pars descendens: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -3,162$,
 $p = 0,012$, $r = 0,645$
- Unterer linksseitiger m. trapezius pars descendens: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -3,207$,
 $p = 0,006$, $r = 0,655$
- Unterer rechtsseitiger m. trapezius pars descendens: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -2,828$,
 $p = 0,030$, $r = 0,577$
- Linksseitiger m. sternocleidomastoideus: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -3,162$,
 $p = 0,012$, $r = 0,645$
- Rechtsseitiger m. sternocleidomastoideus: $MD_{PI} = 0$, $MD_{HL} = 1$, $z = -3,051$,
 $p = 0,012$, $r = 0,623$

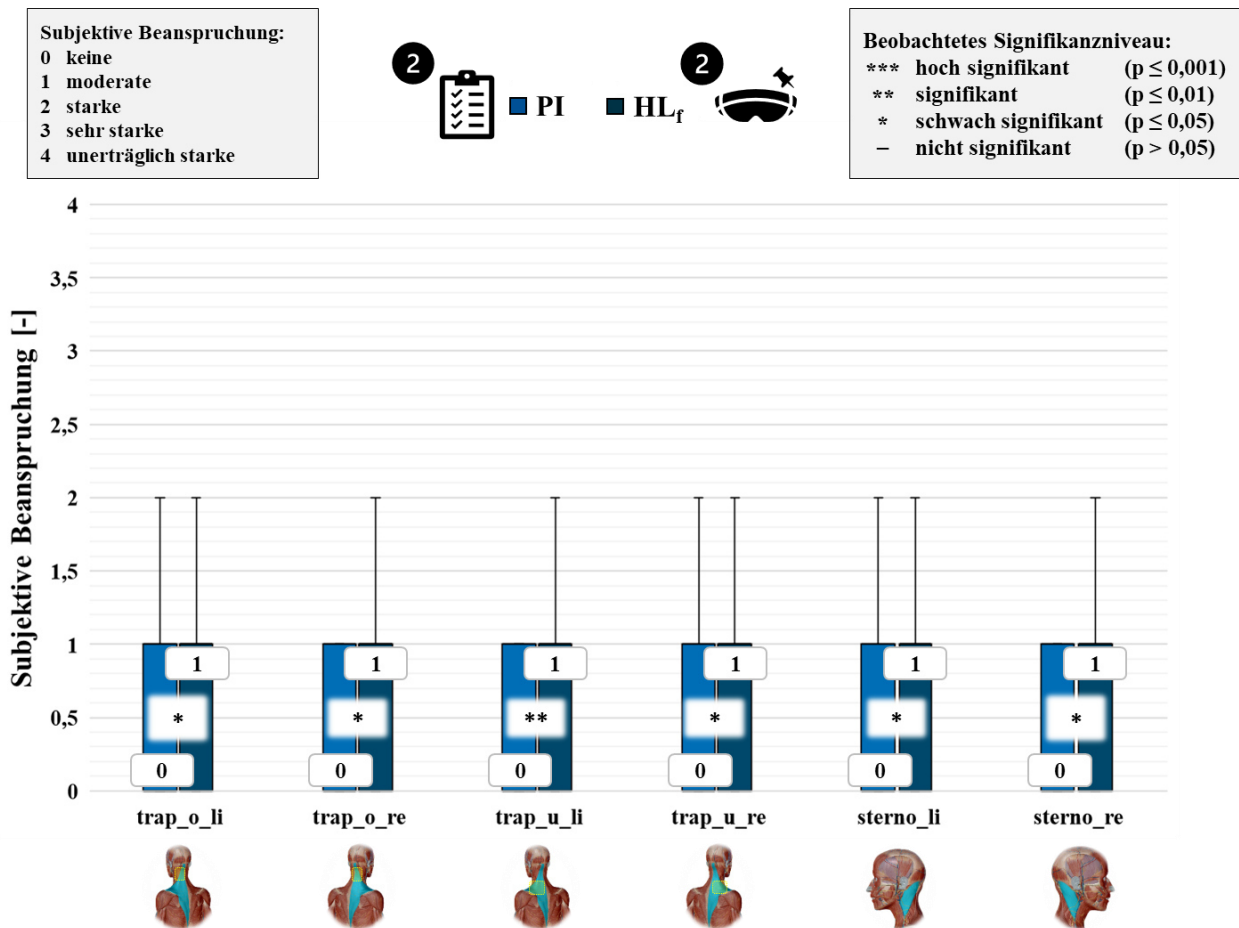


Abb. 8.51: Subjektive Muskelbeanspruchung im Zuge der Durchführung der Rüstprozesse im zweiten Versuchsabschnitt mithilfe der Papierinstruktion und der örtlich gebundenen HMD-Unterstützung

Auch mit fortschreitender Versuchsdauer geht die subjektiv empfundene muskuläre Beanspruchung in Folge der HMD-Anwendung jedoch nicht über ein moderates Niveau hinaus. Insgesamt unterscheiden sich die Einschätzungen der Versuchspersonen zwischen erstem und zweitem Versuchsabschnitt in Bezug auf die wiederholte Durchführung einer Unterstützungsart nicht (z. B. unterer linksseitiger m. trapezius pars descendens: $MD_{HLv, v1} = 1$, $MD_{HLv, v2} = 1$, $z = -2,121$, $p = 0,170$, $r = 0,433$) oder nur marginal (z. B. linksseitiger m. sternocleidomastoideus: $MD_{HLf, v1} = 0,5$, $MD_{HLf, v2} = 1$, $z = -1,886$, $p = 0,236$, $r = 0,385$).

Wärmeempfindungen im Kopfbereich

Für sämtliche Stellen des Kopfbereiches empfanden die Probanden eine im Gegensatz zur Durchführung ohne Unterstützungssystem verstärkte Wärmeentwicklung während der Nutzung des HMD. Ähnlich zum subjektiven muskulären Beanspruchungserleben werden für die Holo-Lens-Anwendung auch die thermografischen Empfindungen im Kopfbereich, deren Datenreihen keiner Normalverteilung unterliegen (z. B. $SW_{PI, v1, Stirn} = 0,531$, $p_{PI, v1, Stirn} < 0,001$;

$SW_{HLf, V2, Hinterkopf} = 0,792$, $p_{HLf, V2, Hinterkopf} < 0,001$; $SW_{HLv, V2, rechtsseitige\ Schläfe} = 0,679$, $p_{HLv, V2, rechtsseitige\ Schläfe} < 0,001$), als durchschnittlich „moderat“ eingestuft. Wie Abbildung 8.52 exemplarisch zeigt, wurden die höchsten Ausprägungen insbesondere im zweiten Rüstabschnitt an der Stirn ($MD_{PI} = 0$, $MD_{HLf} = 1,5$, $z = -3,987$, $p = 0,006$, $r = 0,814$) verspürt.

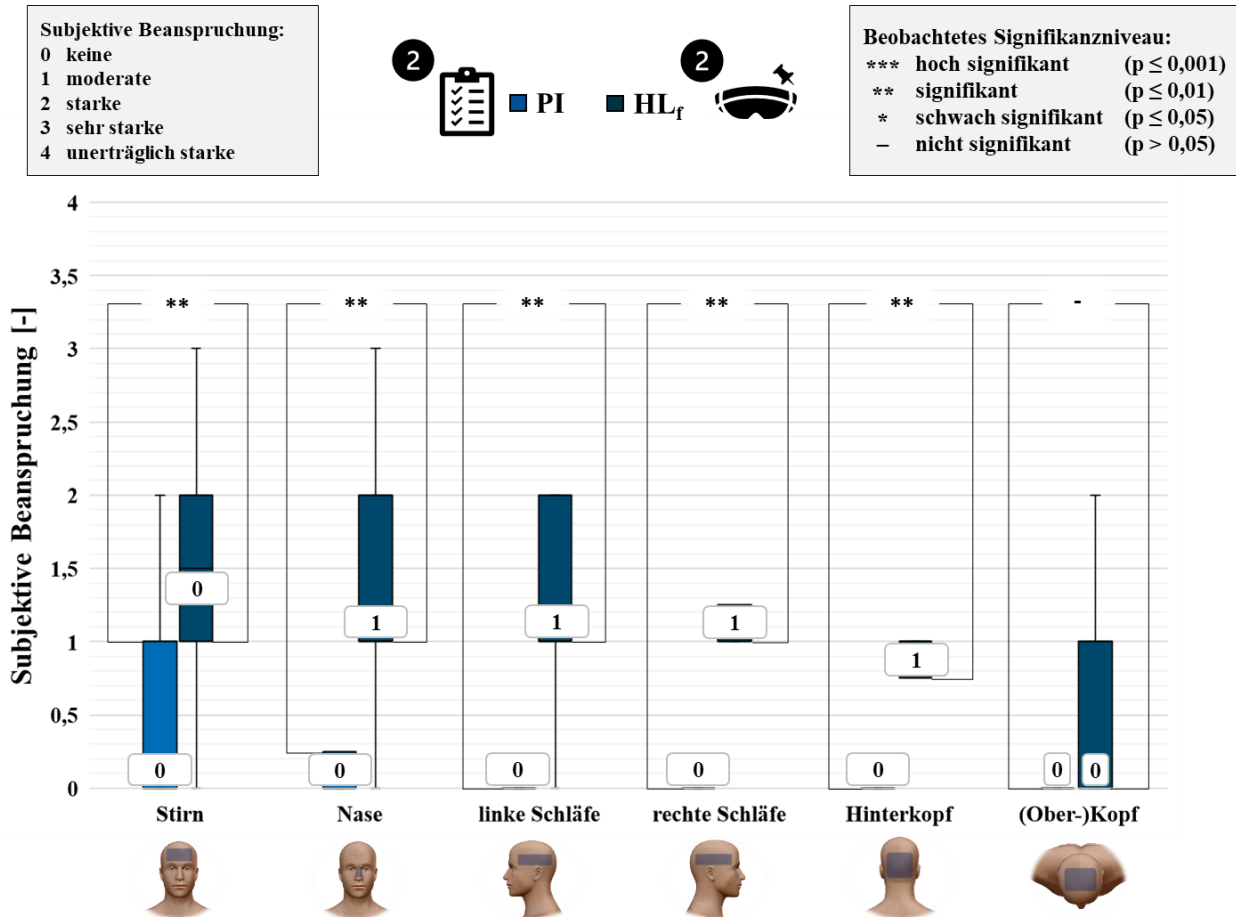


Abb. 8.52: Wärmeempfindungen im Kopfbereich während der Rüstdurchführung anhand einer papierbasierten und holografisch fixierten Unterstützung im zweiten Versuchsabschnitt

Die Vergleiche der unterschiedlichen Durchführungsmodi zeigen, dass mit Ausnahme des Schädelbereiches ($MD_{PI, V1} = 0$, $MD_{HLv, V1} = 0$, $z = -2,309$, $p = 0,126$, $r = 0,471$) durchweg hoch signifikante und effektstarke Unterschiede zwischen den erlebten Beanspruchungen der jeweiligen Kopfparten vorliegen, wie am Beispiel der Nase ($MD_{PI, V1} = 0$, $MD_{HLv, V1} = 1$, $z = -1,897$, $p = 0,232$, $r = 0,387$), der linken Schläfenseite ($MD_{PI, V2} = 0$, $MD_{HLf, V2} = 1$, $z = -4,291$, $p = 0,006$, $r = 0,876$) oder des Hinterkopfes ($MD_{PI, V2} = 0$, $MD_{HLf, V2} = 1$, $z = -3,819$, $p = 0,006$, $r = 0,780$) deutlich wird.

Das erlebte Beanspruchungsniveau bleibt im Hinblick auf eine zunehmende Versuchsdauer sowohl zwischen der Nutzung der Papierinstruktion (z. B. Nase: $MD_{PI, V1} = 0$, $MD_{PI, V2} = 0$, $z = -4,030$, $p = 0,006$, $r = 0,823$) als auch zwischen der fixierten HoloLens-Anwendung (z. B.

rechtsseitige Schläfe: $MD_{HLf, v1} = 1$, $MD_{HLf, v2} = 1$, $z = -2,309$, $p = 0,084$, $r = 0,471$) und dem variablen Fenster-Modus (z. B. linksseitige Schläfe: $MD_{HLv, v1} = 1$, $MD_{HLv, v2} = 1$, $z = -1,604$, $p = 0,327$, $r = 0,327$) konstant und zeigt entsprechend keine signifikanten Unterschiede auf.

8.6.2.2 Rating Scale of Mental Effort

Die subjektiv wahrgenommene kognitive Beanspruchung ist, gemessen am RSME bzw. an den nicht-normalverteilten Datenreihen zur mentalen Anstrengung (z. B. $SW_{PI, v1, na} = 0,906$, $p_{PI, v1, na} = 0,028$; $SW_{HLf, v2, w} = 0,910$, $p_{HLf, v2, w} = 0,035$), sowohl bei der Nutzung der HoloLens ($MD_{HLv, v1, w} = 32$, $MD_{HLv, v2, w} = 25$, $z = -2,487$, $p = 0,078$, $r = 0,508$; siehe Abb. 8.53) als auch im Rahmen der Anwendung der Papier-Instruktion ($MD_{PI, v1, w} = 25$, $MD_{PI, v2, w} = 20$, $z = -1,568$, $p = 0,351$, $r = 0,320$) im ersten Versuchsdurchgang höher als im zweiten Rüstabschnitt.

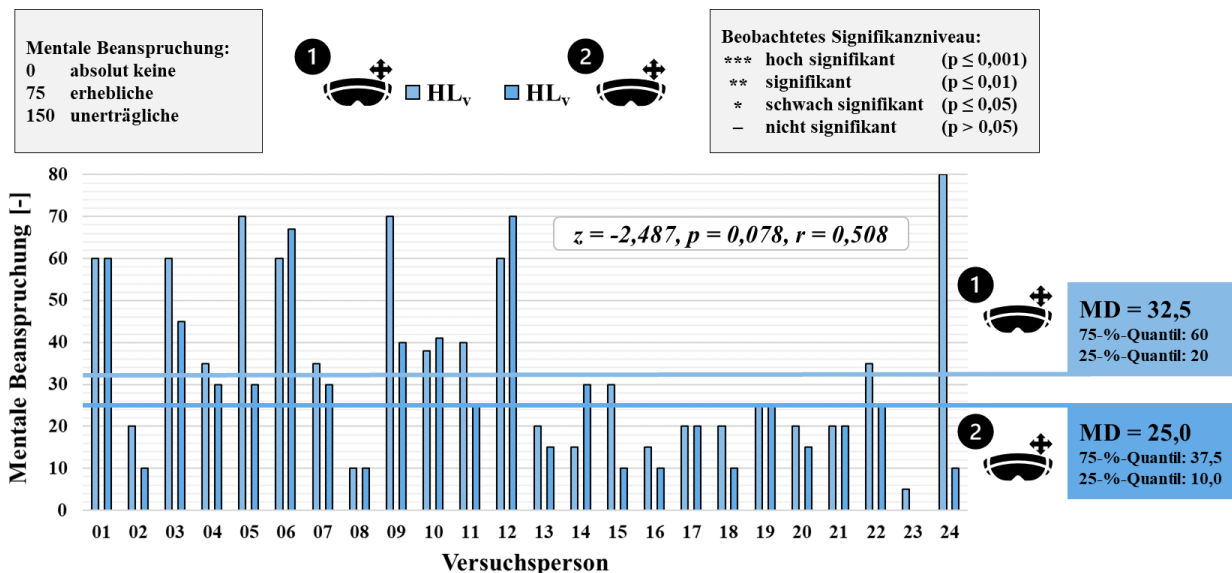


Abb. 8.53: Mentale Beanspruchung – gemessen anhand des RSME – während der Nutzung des Tag-along-Modus der HoloLens innerhalb des ersten und zweiten Rüstabschnittes

Weiterhin empfanden die Versuchspersonen während der Arbeitsaufgabe (z. B. $MD_{HLf, v1, w} = 30$, $MD_{HLf, v2, w} = 22$, $z = -2,285$, $p = 0,110$, $r = 0,466$), d. h. unmittelbar nach dem Einschrauben des Bolzens (sechster Rüstschritt), eine im Vergleich zum mentalen Befinden am Ende der Versuchsdurchführung (z. B. $MD_{HLf, v1, na} = 20$, $MD_{HLf, v2, na} = 20$, $z = -1,312$, $p = 0,570$, $r = 0,268$) erhöhte Beanspruchung. Insgesamt wurde die durch den RSME erfasste kognitive Beanspruchung unabhängig von den unterschiedlichen Durchführungsmodi der Datenbrille sowohl während (z. B. $MD_{PI, v1, w} = 25$, $MD_{HLv, v1, w} = 32$, $z = -2,205$, $p = 0,110$, $r = 0,450$) als auch nach der Versuchsdurchführung (z. B. $MD_{PI, v1, na} = 20$, $MD_{HLv, v1, na} = 30$, $z = -3,004$, $p = 0,018$,

$r = 0,613$) durch die Anwendung der HoloLens signifikant stärker empfunden als ohne deren Verwendung, wenngleich die erlebten Anstrengungen ein moderates Maß nicht überstiegen (siehe Abb. 8.54).

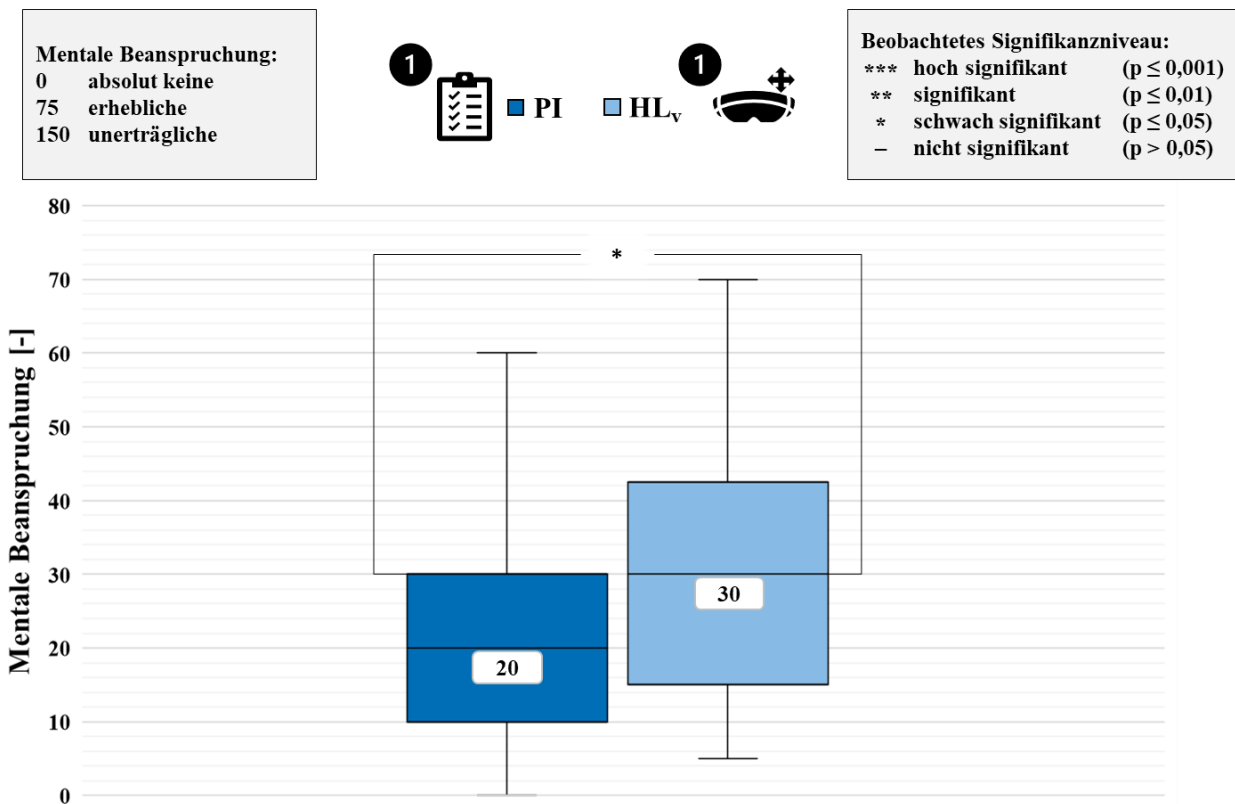


Abb. 8.54: Mentale Beanspruchung – gemessen anhand des RSME – unmittelbar nach der jeweils ersten Versuchsdurchführung im Zuge der Nutzung der Papierinstruktion und der HoloLens-Anwendung im variablen Fenstermodus

8.6.2.3 NASA Task Load Index

Die Auswertung des mehrdimensionalen NASA-TLX-Fragebogens und dessen normalverteilten Daten (z. B. $KS_{PI, V1, Gesamtbeanspruchung} = 0,124$, $p_{PI, V1, Gesamtbeanspruchung} > 0,200$; $KS_{HLv, V1, GA} = 0,156$, $p_{HLv, V1, GA} = 0,133$; $KS_{HLf, V2, ZA} = 0,162$, $p_{HLf, V2, ZA} = 0,104$) legte dar, dass die Gesamtbeanspruchung der Probanden im Rahmen beider Versuchsabschnitte bei der Anwendung mit Datenbrille im Vergleich zur Nutzung der Papierinstruktion während des Tag-along-Modus (z. B. $M_{PI, V1} = 21,6 \pm 15,4$, $M_{HLv, V1} = 25,0 \pm 14,6$, $t = -0,848$, $p > 0,999$, $d = 0,173$) geringfügig höher war. Im Zuge der örtlichen Bindung der Instruktion wurde die HoloLens-Anwendung im zweiten Rüstabschnitt einem der papierbasierten Anleitung nahezu identischen Beanspruchungsniveau zugeordnet ($M_{PI, V2} = 16,9 \pm 11,3$, $M_{HLf, V2} = 16,7 \pm 9,9$, $t = 0,088$, $p > 0,999$, $d = 0,018$). Die wiederholte Nutzung der Datenbrille führt allerdings auch dazu, dass die Gesamtbeanspruchung mit fortschreitender Versuchsdauer sinkt ($M_{HLv, V1} = 25,0 \pm 14,6$,

$M_{HLv, v2} = 17,3 \pm 11,2, t = 3,949, p = 0,006, d = 0,806$). Sämtliche Beanspruchungswerte bewegen sich auf einem moderaten bis niedrigen Anforderungslevel. Die zu einem großen Teil geringen Mittelwertsunterschiede der ganzheitlichen Anforderungen gehen mit einem überwiegend nicht-signifikanten Effekt einher.

Innerhalb des ersten Rüstabschnitts wurde deutlich, dass die zur Arbeitsaufgabe erforderliche Interaktion mit der HoloLens offensichtlich zunächst zu einer verstärkten geistigen Anforderung führte ($M_{PI, v1} = 19,4 \pm 19,0, M_{HLv, v1} = 30,8 \pm 20,9, t = -2,345, p = 0,140, d = 0,479$; siehe Abb. 8.55), die allerdings nach mehrfacher Wiederholung der Rüstvorgänge abnahm ($M_{HLv, v2} = 16,5 \pm 16,5, t = 4,337, p = 0,006, d = 0,885$; siehe Abb. 8.56).

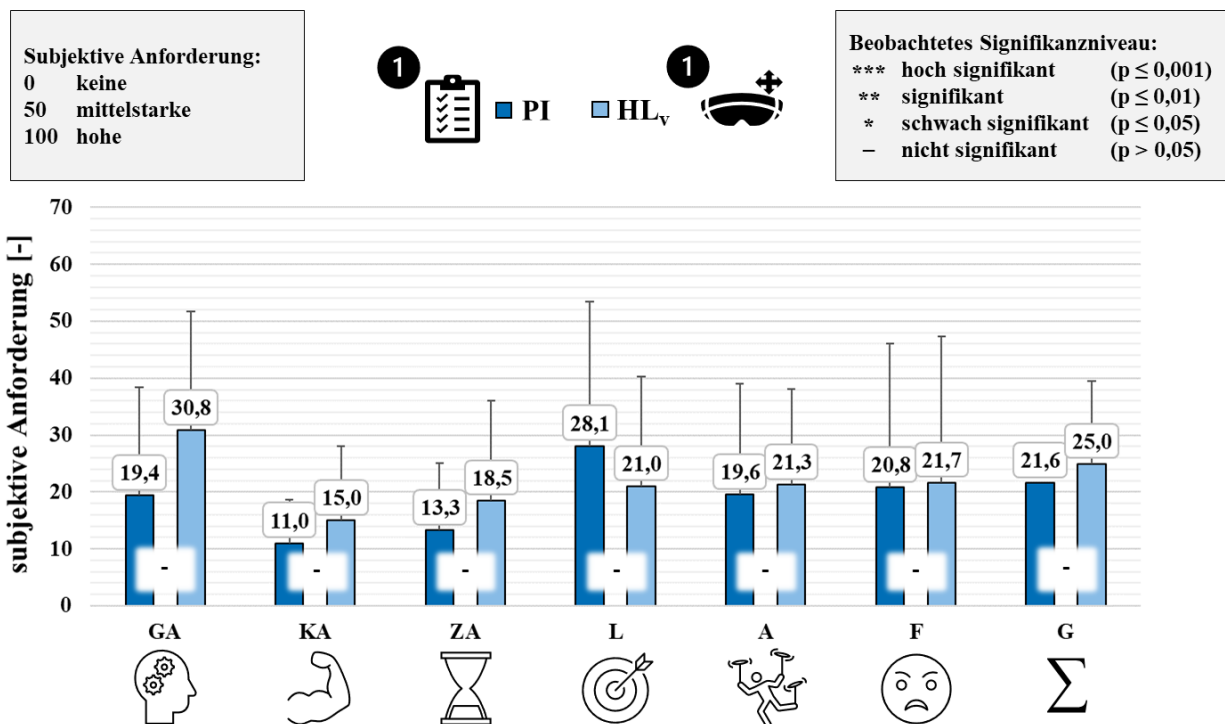


Abb. 8.55: Subjektive Anforderungen – gemessen anhand des NASA-TLX – während der und holografisch-variablen Rüstunterstützung innerhalb des ersten Versuchsabschnittes

Weiterhin ist im Versuchsverlauf eine subjektive Leistungssteigerung sowohl für die papierbasierte ($M_{PI, v1} = 28,1 \pm 25,3, M_{PI, v2} = 18,1 \pm 17,0, t = -1,986, p = 0,354, d = 0,405$) als auch die holografische Anwendung ($M_{HLf, v1} = 28,1 \pm 21,2, M_{HLf, v2} = 19,2 \pm 19,7, t = 1,921, p = 0,354, d = 0,806$) erkennbar. Außerdem nahm in diesem Zusammenhang die wahrgenommene Unsicherheit der Probanden ohne ($M_{PI, v1} = 20,8 \pm 25,3, M_{PI, v2} = 11,0 \pm 12,2, t = -2,402, p = 0,150, d = 0,490$) und mit Anwendung der HoloLens ($M_{HLf, v1} = 17,9 \pm 14,7, M_{HLf, v2} = 11,0 \pm 13,2, t = 1,990, p = 0,295, d = 0,406$) ab.

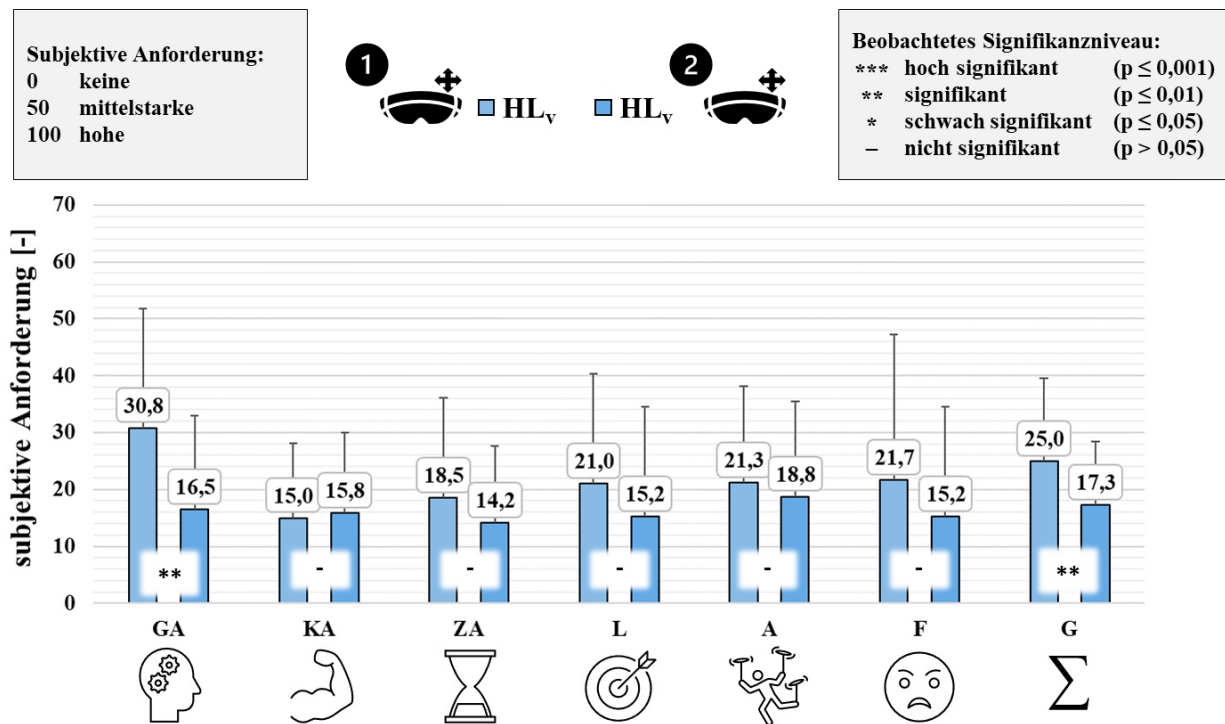


Abb. 8.56: Subjektive Anforderungen – gemessen anhand des NASA-TLX – im Zuge der Nutzung des Tag-along-Modus während des ersten und zweiten Rüstabschnittes

Das verminderte Beanspruchungsniveau und die geringen nicht-signifikanten und effektlosen Mittelwertsunterschiede der übrigen Items, d. h. der physischen ($M_{PI, v1} = 11,0 \pm 7,7$, $M_{HL, v1} = 15,0 \pm 13,1$, $t = -1,940$, $p = 0,384$, $d = 0,396$) und zeitlichen Anforderung ($M_{HLv, v1} = 18,5 \pm 17,5$, $M_{HLv, v2} = 14,2 \pm 13,5$, $t = 1,505$, $p = 0,876$, $d = 0,307$) sowie des Anstrengungsgrads ($M_{HLf, v1} = 20,6 \pm 13,6$, $M_{HLf, v2} = 18,8 \pm 16,8$, $t = 1,547$, $p = 0,816$, $d = 0,316$), zwischen den unterschiedlichen Durchführungsarten deuten darauf hin, dass die Probanden sich weder einer mühseligen und arbeitsintensiven körperlichen Aktivität noch einer hektischen bzw. mit Zeitdruck verbundenen Aufgabe ausgesetzt sahen.

8.6.2.4 Visual Fatigue Questionnaire

Die Auswertung sämtlicher Symptome, welche die Probanden anhand des VFQ bewerteten, zeigen, dass einzig hinsichtlich der geistigen Ermüdung, der wahrgenommenen Kopf- und Nackenschmerzen sowie in Bezug auf gereizte und schwere Augen markante Unterschiede zwischen der Anwendung der drei Unterstützungsarten festgestellt werden konnten (siehe Abb. 8.57).

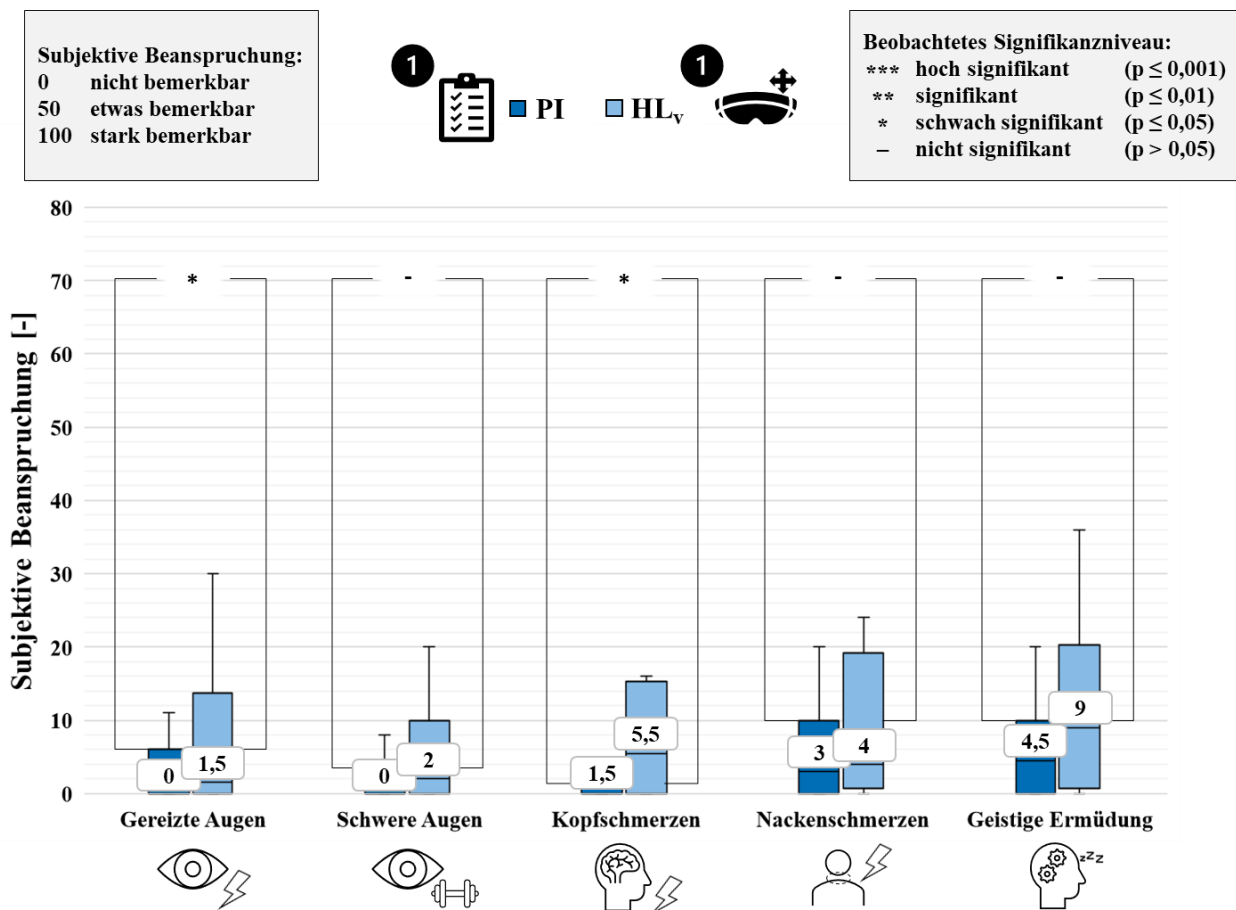


Abb. 8.57: Symptomerscheinungen „gereizte Augen“ und „schwere Augen“ sowie „Kopfschmerzen“, „Nackenschmerzen“ und „geistige Ermüdung“ während des ersten Versuchsabschnittes im Rahmen der Nutzung der papierbasierten und der variablen HoloLens-Unterstützungsform

Sämtliche Datenreihen unterliegen keiner Normalverteilung (z. B. $SW_{PI, V1, Geringe\ Augen} = 0,677$, $p_{PI, V1, Geringe\ Augen} < 0,001$; $SW_{HLv, V1, Kopfschmerzen} = 0,720$, $p_{HLv, V1, Kopfschmerzen} < 0,001$; $SW_{HLf, V2, Kopfschmerzen} = 0,832$, $p_{HLf, V2, Kopfschmerzen} = 0,001$).

Im ersten Versuchsabschnitt verspürten die Versuchspersonen im Zuge der Nutzung der HoloLens im Vergleich zur papierbasierten Durchführung verstärkte Schmerzen im Nacken- ($MD_{PI, V1} = 3$, $MD_{HLv, V1} = 4$, $z = -2,304$, $p = 0,126$, $r = 0,470$) und Kopfbereich ($MD_{PI, V1} = 0$, $MD_{HLv, V1} = 5,5$, $z = -3,080$, $p = 0,012$, $r = 0,629$). Außerdem beklagten sie gereizte bzw. brennende ($MD_{PI, V1} = 0$, $MD_{HLf, V1} = 1,5$, $z = -3,258$, $p = 0,006$, $r = 0,665$) und schwere Augen ($MD_{PI, V1} = 0$, $MD_{HLf, V1} = 3$, $z = -2,704$, $p = 0,042$, $r = 0,552$). Auffällig ist weiterhin, dass die Symptombeschwerden im Versuchsverlauf für die HoloLens-Anwendung im fixierten Fenstermodus nur marginal sowie im Zuge der Nutzung der Papierinstruktion deutlich signifikant und effektstark zunahm (siehe Abb. 8.58), während sie im Rahmen der Rüstprozessausführung mithilfe des Tag-along-Modus – allerdings ohne erkennbare Signifikanzen und Effektstärken – abnahmen.

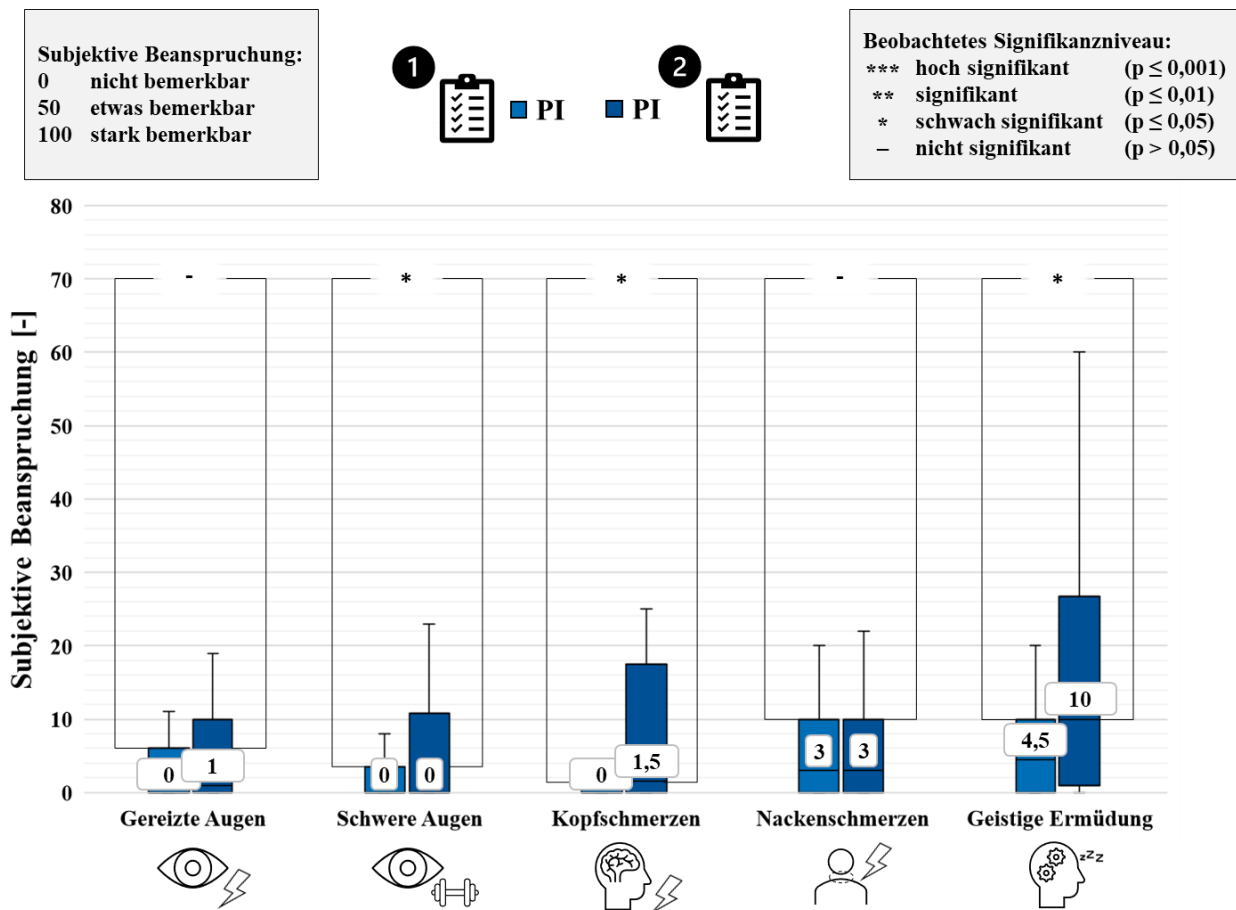


Abb. 8.58: Subjektiv erlebte gereizte und schwere Augen sowie Kopf- und Nackenschmerzen mit- samt geistigen Ermüdungserscheinungen im Versuchsverlauf am Beispiel der Rüst- durchführung mithilfe der Papierinstruktion

Diese Effekte können exemplarisch anhand des Items „Geistige Ermüdung“ für die Papierin- struktion ($MD_{PI, V1} = 4,5$, $MD_{PI, V2} = 10$, $z = -2,962$, $p = 0,018$, $r = 0,605$), den örtlich gebundenen Fenstermodus der HoloLens ($MD_{HLf, V1} = 8,5$, $MD_{HLf, V2} = 10$, $z = -1,881$, $p = 0,265$, $r = 0,384$) und den variablen Darstellungsmodus der Datenbrille ($MD_{HLv, V1} = 9$, $MD_{HLv, V2} = 5$, $z = -0,112$, $p > 0,999$, $r = 0,023$) aufgezeigt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Verwendung der HoloLens einen mitun- ter statistisch signifikanten Einfluss auf die visuelle Ermüdung ausübte. Die Medianunterschiede sind allerdings einem geringen bzw. kaum bis moderat feststellbaren Beanspruchungsniveau zu- zuordnen.

8.6.2.5 Abschlussbefragung

Die in Anlehnung an die in Teilstudie 1 erfolgte quantitative Abschlussbefragung wurde auch in Teilstudie 2 durchgeführt. Eine Übersicht der deskriptiven Auswertung der einzelnen Fragen ist Abbildung 8.59 und Abbildung 8.60 zu entnehmen.

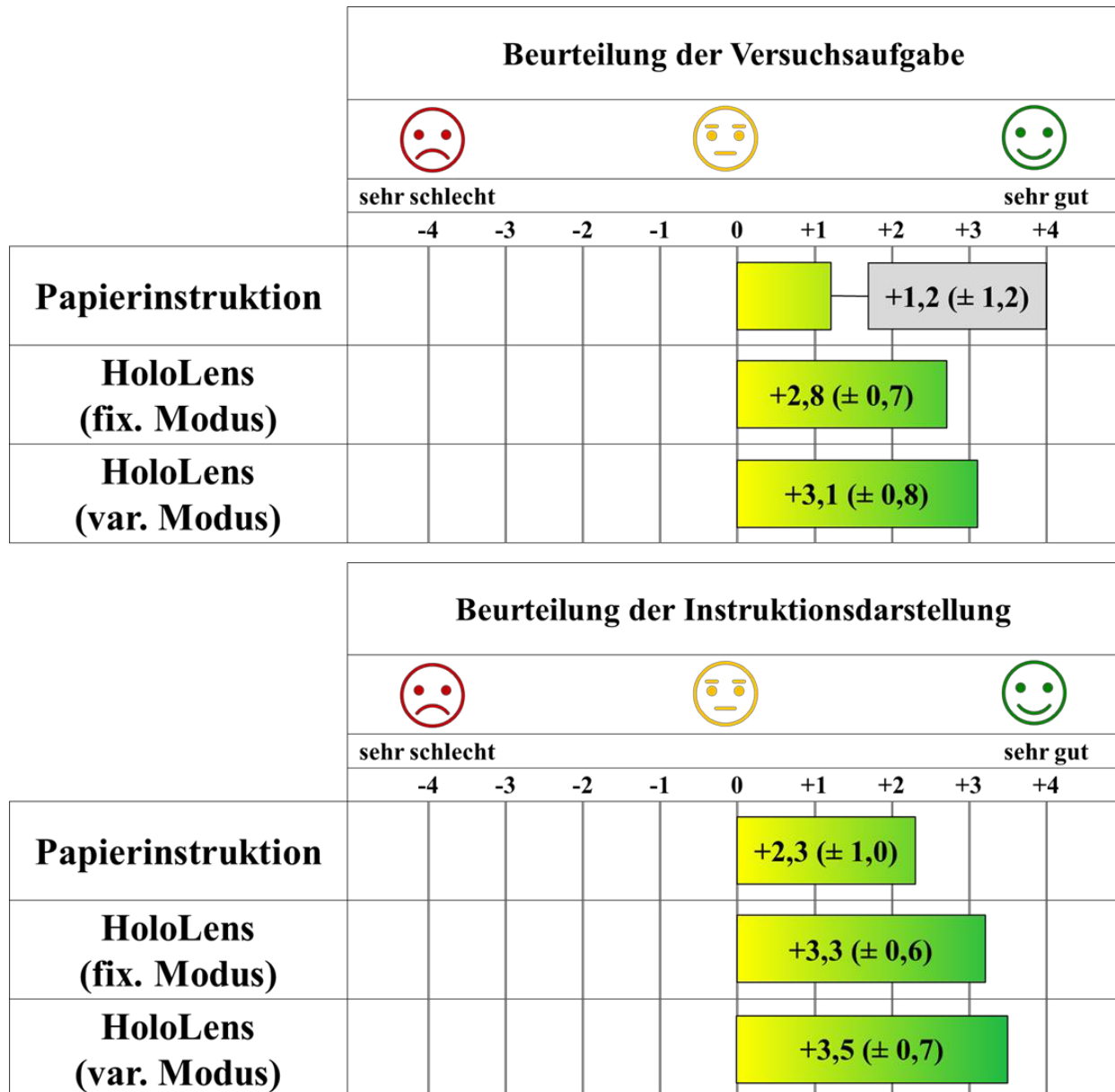


Abb. 8.59: Subjektive Empfindung zur Beurteilung der Versuchsaufgabe und der Instruktionsdarstellung im Vergleich der unterschiedlichen Durchführungsarten im Zuge der Versuchsdurchführung von Teilstudie 2

Das Niveau der Befragungsergebnisse der beiden Teilstudien ist für nahezu sämtliche Fragen vergleichbar. Die Probanden gaben an, dass sie die Rüstaufgabe mithilfe der HoloLens sowohl im fixierten ($M = 2,8 \pm 0,7$) als auch im variablen Fenstermodus ($M = 3,1 \pm 0,8$) „gut“ bis „sehr gut“ durchführen konnten. Die papierbasierte Unterstützung wurde hingegen nur geringfügig „gut“

($M = 1,2 \pm 1,2$) bewertet. Obwohl einzelne Probanden zu Beginn der Versuchsdurchführung zunächst mit der Interaktion einer ihnen unbekanntem Software sowie eines überwiegend neuartigen Endgerätes konfrontiert wurden und zudem einen – ebenfalls unbekanntem – Rüstvorgang an einer Rotationszugbiegemaschine durchführen sollten, konnte der Rüstprozess trotz „[...] anfänglicher Überforderung [...]“ (VP03) „[...] im Laufe des Versuchs schnell und einfach [...]“ (VP20) durchgeführt werden. Proband Nr. 8 gab allerdings bspw. an, die papierbasierte Unterstützung der holografischen Unterstützung vorzuziehen, da „[...] man alles im Überblick hat und es aus meiner Sicht auch schneller geht, da man durch die vielen Informationen nicht gestört wird [...]“.

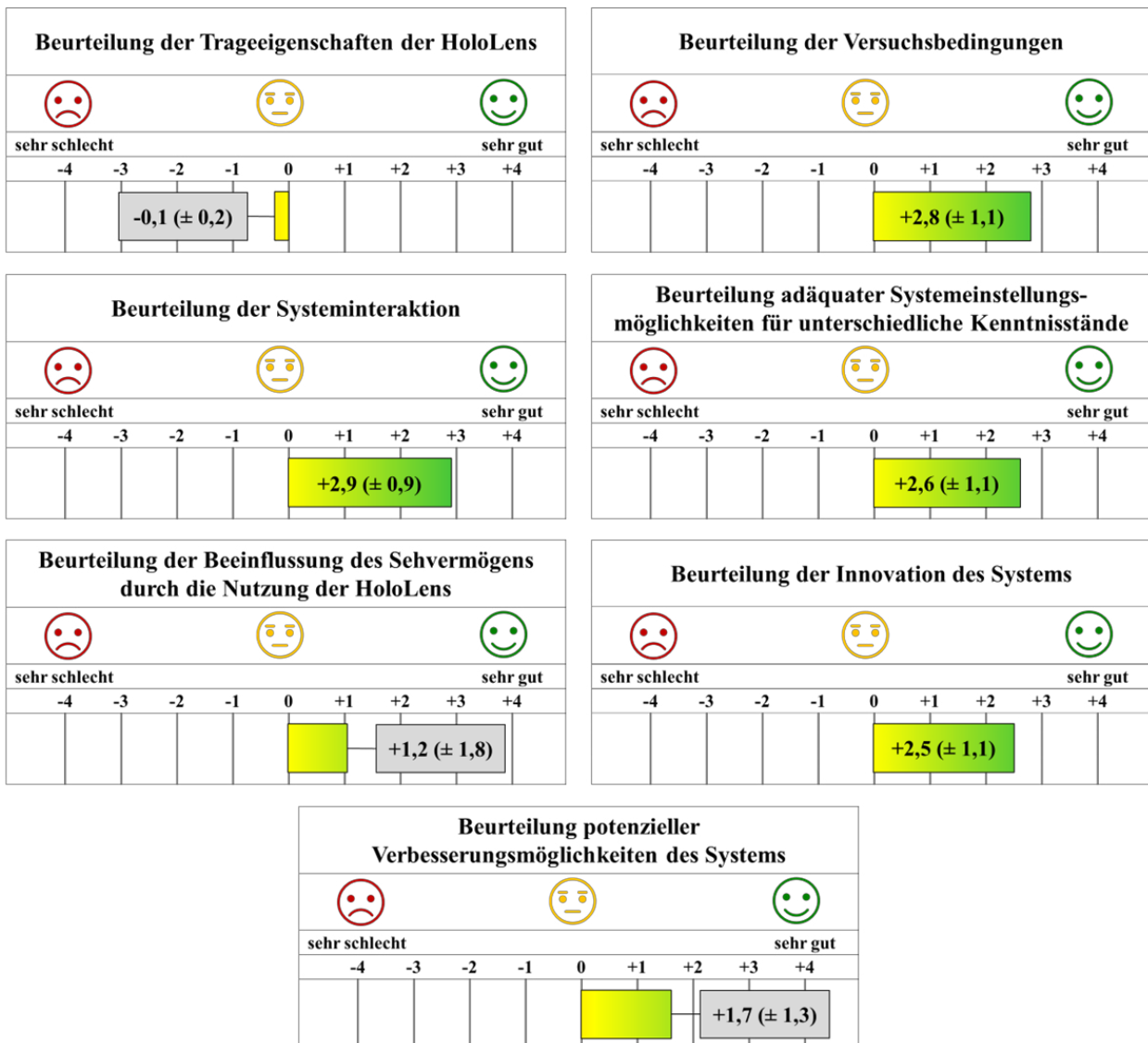


Abb. 8.60: Subjektive Empfindung weiterer unterschiedlicher Beurteilungskriterien im Zuge der Versuchsdurchführung von Teilstudie 2

Insgesamt überwiegend positiv fiel die Beurteilung der Instruktionsdarstellung für sämtliche Unterstützungsarten aus. Während der Tag-along-Modus ($M = 3,5 \pm 0,7$) und der örtlich gebundene Fenstermodus der HoloLens ($M = 3,3 \pm 0,6$) für „gut“ bis tendenziell „sehr gut“ empfunden

wurde, konnte die Darstellung der Papierinstruktion ebenfalls für „gut“ ($M = 2,3 \pm 1,0$) befunden werden. Im Gegensatz zu den extremen seitlichen Kopfbewegungen, die im Rahmen der ersten Teilstudie u. a. eingenommen werden sollten, und den damit einhergehenden Schwierigkeiten des vollständigen Einsehens der Instruktion, wurde dieser Effekt durch den dynamischen Aufgabencharakter weitgehend aufgehoben. Nichtsdestotrotz wurde angemerkt, dass die „[...] ohnehin nicht ganz so hoch auflösende Grafik der HoloLens durch stärkeren Lichteinfall von außen beeinträchtigt wird und man dann die Kontraste nicht so gut sieht [...]“ (VP05).

Wie bereits in Teilstudie 1, fällt auch in der Folgestudie die Beurteilung der Trage- bzw. Komforteigenschaften der HoloLens negativ aus, wenngleich ein tendenziell „neutrales“ Ergebnis vorliegt ($M = -0,1 \pm 0,2$). Erneut wurde insbesondere das hohe Eigengewicht und die harten Auflageflächen der HoloLens bemängelt (VP08):

„Insgesamt ist sie [die HoloLens] zu schwer. Dadurch bekommt man schnell Druckstellen an der Nase und an der Stirn“.

Ein zusätzliches Komfortproblem stellte z. B. für Versuchsperson 3 die eigene Brille dar, da der Sitz der HoloLens dadurch beeinträchtigt schien.

Das „gute“ Ergebnis zur Befragung der Versuchsbedingungen ($M = 2,8 \pm 1,1$) zeigt, dass die Probanden mit der Rüstaufgabe bzw. der mehrfachen Durchführung des Rüstprozesses durchweg zufriedenstellend zurechtkamen („Der Versuch war insgesamt echt gut aufgebaut“, VP24). In diesem Zusammenhang sei auch die für „gut“ bis „sehr gute“ befundene Interaktion mit der Datenbrille ($M = 2,9 \pm 0,9$) erwähnt, die durch VP03 bestätigt wurde:

„Die bildhafte Darstellung und die einfache Bedienung der Brille sind [...] ein großer Vorteil gegenüber der Papier-Version. Man arbeitet effizienter und auch effektiver“.

Dennoch war „[...] ein gewisser Lerneffekt bzw. eine gewisse Zeit nötig, um die Gesten auch problemlos durchführen zu können“ (VP18). Die Versuchspersonen vertraten weiterhin mehrheitlich die Annahme, dass unabhängig von dem (technischen) Kenntnisstand der Probanden die Einstellung und Bedienung des Unterstützungssystems adäquat sowie leicht verständlich waren ($M = 2,6 \pm 1,1$). Erneut wurden zu Teilstudie 1 vergleichbare Aussagen getroffen, die einerseits unabhängig von der Expertise des Probanden auf eine schnelle Gewöhnung und einen inhaltlich umfangreichen Input abzielten („Auch ohne richtige Rüst-Erfahrung wurde man durch die Videos bzw. die Bilder und die Hologramme sehr unterstützt“, VP11). Andererseits erfuhren Versuchspersonen vereinzelt eine anfängliche Überforderung, die sich im Versuchsverlauf allerdings verminderte (VP08):

„Wenn man zuvor noch keine Maschine gerüstet und mit so einem System gearbeitet hat, ist man am Anfang ehrlich gesagt etwas überfordert. Wobei sich das spätestens nach dem zweiten Rüsten legt.“

Ähnlich zu den Erkenntnissen aus Teilstudie 1 merkten die Probanden an, dass ihr Sehvermögen zu Beginn der HoloLens-Nutzung zunächst geringfügig beeinträchtigt war. *Proband Nr. 10* beschrieb diesen Umstand als *„[...] ein Gefühl, durch einen leichten Nebel zu schauen“*. Dieser Effekt schwächte sich jedoch im Laufe der Versuchsdurchführung ab, sodass ebenfalls eine „positiv neutrale“ Beurteilung ($M = 1,2 \pm 1,8$) resultierte.

Der HoloLens der ersten Generation wurden hinsichtlich des Innovations- und Verbesserungspotenzials gleichermaßen annähernd „gute“ Chancen zugerechnet. Die Innovation der HoloLens bzw. die generelle Idee der Nutzung von Datenbrillen in Produktionskontexten wurde für positiv ($M = 2,5 \pm 1,1$) befunden, wenngleich Systembestandteile zu optimieren sind ($M = 1,6 \pm 1,3$). Diese Aspekte wurden durch die folgenden Zitate belegt:

„Es macht total Sinn, so eine Brille mit der Software für Rüstprozesse oder auch Montagevorgänge, Kommissionierung usw. zu nutzen. Wenn man das noch als Remote-System und Analyse-Tool für das Qualitätsmanagement nutzen kann, ist das definitiv etwas, was in Zukunft die Regel sein könnte“ (VP04).

„Die HoloLens ist schon sehr innovativ, aber gerade was das Handling [Interaktion, Anm.] mit der Brille, das Sichtfeld und die grafische Darstellung bzw. Auflösung betrifft, gibt es sicherlich noch Verbesserungspotenziale“ (VP 16).

Im Anschluss wurden die Probanden einem qualitativen Interview unterzogen, sodass sie die vom Versuchsleiter gestellten Fragen offen beantworten konnten. Die insgesamt 24 Interviews wurden, wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben, mithilfe der „Intelligent Verbatim“-Methode transkribiert. Die Transkripte wiesen eine Gesamtanzahl von insgesamt 56.733 Wörtern auf. Die Daten wurden anhand von 17 mehr oder weniger an die Interviewfragen angelehnten spezifischen Codes analysiert bzw. kodiert und ausgewertet, wie z. B. generelle Vor- und Nachteile der Papier-Instruktion und der HoloLens, kognitive Beanspruchung im Zuge des Versuchs oder empfundene Lerneffekte. Den Kodierungen wurden 755 Elemente oder relevante Zitate zugeordnet. Nachfolgend werden für jeden einzelnen Code zwei exemplarische Beispiele aufgeführt. Ausgewählte Elemente wurden bzw. werden an geeigneter Stelle im Zuge der Ergebnisdarstellung und im Rahmen der Diskussion dieser Arbeit platziert, um dem Leser die inhaltliche Verbindung zwischen qualitativen und quantitativen Erkenntnissen aufzuzeigen.

1. Versuchssetting (4 codierte Segmente)
 - „Der Versuchsaufbau war insgesamt sehr gelungen, würde ich sagen.“ (VP03)
 - „[...] die Messtechnik, also genauer gesagt die Elektroden, spannen etwas. Dadurch verspürt man die ganze Zeit einen gewissen „Effekt“.“ (VP09)
2. Generelle Vor- und Nachteile der Datenbrille (50 codierte Segmente)
 - „Für die Positionierung ist die AR oder die Hologramme sehr hilfreich. Für die Handgriffe sind die Videos wirklich sehr deutlich und sehr klar, also speziell im Hinblick auf die Darstellung.“ (VP04)
 - „An der HoloLens stört mich das geringe Sichtfeld am meisten. Und ein bisschen die teilweise ungenaue Gestensteuerung und die Instabilität der Platzierung der Hologramme. [...] Das sind für mich die größten Schwachstellen aktuell.“ (VP19)
3. Generelle Vor- und Nachteile der Papierinstruktion (28 codierte Segmente)
 - „Wenn es um kompliziertere Aufgaben geht oder wenn man etwas nicht genau sehen kann, also wie zum Beispiel beim Falten glätter, dann sah man das auf dem Video viel genauer.“ (VP14)
 - „Insgesamt war die Aufgabe aus meiner Sicht sehr selbsterklärend. Was mir ansonsten an Erklärungen fehlte, hat man in den Papieren einsehen können. Und dadurch hatte ich das Gefühl: Man ist ohne HoloLens schneller.“ (VP18)
4. Darstellung der Instruktion (83 codierte Segmente)
 - „Die 3D-Visualisierung, wie man jetzt zum Beispiel den Kolben eindreht oder so, ist effektiver oder besser als [...] ein einfaches Bild. Das kann ich mir nämlich auch auf einem Blatt Papier anschauen.“ (VP03)
 - „Die Kombination [der holografischen Inhalte der HoloLens, Anm.] und die Interaktion mit der Software empfand ich als gut und recht konsistent. Also die Fenster, der Stil usw., das war immer gleich, sodass man sich nicht immer neu orientieren musste. Das war auf jeden Fall gut. Das Einzige, was nicht so ideal war, war, dass das Bild als solches nicht wirklich viel geholfen hat.“ (VP11)
5. Informationsgehalt und Genauigkeit der Instruktionstypen (14 codierte Segmente)
 - „Irgendwann habe ich angefangen, bei komplizierteren Schritten die Pausefunktion [des Videos, Anm.] zu nutzen, um im Prinzip noch weniger geistig angestrengt – so blöd es auch klingen mag – zu sein. Durch die Pausefunktion kannst du zum Beispiel den ersten Teil [des Schiebers, Anm.] einfach einsetzen, dann einschrauben und dann das Video zu Ende schauen. Dann kannst du besser abgleichen, ob es passt.“ (VP03)
 - „In dem Video und dem Bild könnten Informationen verloren gehen, weil man da die Kontraste und Ausformungen nicht so gut sieht, wie auf einer technischen Zeichnung.“ (VP05)
6. Usability bzw. Interaktion mit der HoloLens (147 codierte Segmente)
 - „Ich bin mit der Interaktion [der HoloLens, Anm.] sehr gut zurechtgekommen. Das Ganze, wie der Airtap oder die Kopfbewegungen, ist natürlich gewöhnungsbedürftig, aber schnell umsetzbar – und macht darüber hinaus auch Spaß.“ (VP01)
 - „Am Anfang hatte ich Probleme mit dem „Klicken“ [Anwählen von Interaktionsschaltflächen, Anm.]. Man muss erstmal damit klarkommen, in welcher Entfernung und wie schnell man klicken muss. Und gleichzeitig muss man den Kopf ruhig genug halten, um den Fokus [Gaze-Point, Anm.] auf dem Button zu halten. Ab dem zweiten oder dritten Mal ging das dann besser, dann hat man es raus.“ (VP07)

7. Usability bzw. Interaktion mit der Applikation (19 codierte Segmente)
 - „Der Umgang mit der App ist mir eigentlich leichtgefallen. Der Wechsel zwischen den [Rüst-, Anm.] Schritten oder das Ansehen der Videos war im Prinzip selbsterklärend. Außerdem war die Anordnung der Hologramme und der schrittweise Aufbau echt gut.“ (VP08)
 - „Durch die Windows-ähnliche Umgebung ist die Software gut zu verstehen und man kommt schnell rein. Allerdings waren mir die Videos zu umfangreich. Vielleicht könnte man den gleichen Informationsgehalt in eine 3D-Animation packen, die automatisch abläuft.“ (VP10)
8. Ergonomische Aspekte im Rahmen der Versuchsdurchführung (37 codierte Segmente)
 - „Am Anfang ist das Tragen der Brille etwas ungewohnt, gegen Ende war es ok. Auf Dauer verursacht es jedoch Druckstellen, da sie doch relativ schwer ist. Ich hatte auch ein wenig Kopfschmerzen nach dem Versuch.“ (VP02)
 - „Den Tragekomfort würde ich tatsächlich am allerneigativsten bewerten. [...] An Nase und Stirn tat es schon irgendwann echt weh. Beim ersten Mal habe ich schon gedacht: ‚Also, wenn man damit jetzt sechs, sieben Stunden oder auch nur eine ganze Stunde oder zwei Stunden arbeiten müsste, wäre das auf keinen Fall zumutbar.‘ Also da ist der Komfort so schlecht, dass sich da auf jeden Fall noch einiges tun muss.“ (VP24)
9. Kognitive Aspekte im Rahmen der Versuchsdurchführung (132 codierte Segmente)
 - „Du hast halt mit der HoloLens auf noch mehr zu achten. Also anstatt einfach immer wieder einen Rüstprozess zu machen, musst du auch die [Datenbrille, Anm.] bedienen und musst dich noch auf die ganze Visualisierung konzentrieren. Da muss der Kopf schon ein wenig arbeiten.“ (VP15)
 - „Aus meiner Sicht vereinfacht die HoloLens das Ganze auf jeden Fall. Allein, dass du schon diese Hologramme siehst, wo genau oder wie etwas montiert werden soll. Zusammen mit dem Video ist das natürlich auch sehr vereinfachend, du musst es ja einfach nur nachahmen. Deswegen fiel mir das dann auch nicht schwer.“ (VP23)
10. Kurz- und/oder langzeitiger Gebrauch der HoloLens (52 codierte Segmente)
 - „Kommt auf die Perspektive an. Ich könnte mir zum Beispiel vorstellen, dass man das zum Anlernen neuer Mitarbeiter verwenden kann. Dann braucht man niemanden, der die Anleitung ständig durchführt, so sparst du dir einen Mitarbeiter. Dann wäre das für das Unternehmen natürlich langfristig sinnvoll. Für den einzelnen dann allerdings kurzfristig, da es irgendwann anstrengend wird.“ (VP06)
 - „Für die Firma würde ich sagen: Langzeitgebrauch. Aber zum Beispiel, wenn man jetzt ein und denselben Arbeitsschritt immer wieder ausführt oder immer das Gleiche zusammenbaut, dann weiß ich nicht, ob man die Brille immer braucht. Dann wird es irgendwann [...] überflüssig. Für das Kennenlernen der Prozesse macht es immer Sinn.“ (VP21)
11. Lerneffekt und Vermittlung von Erfahrungswerten (48 codierte Segmente)
 - „Also man entwickelt in diesen sechs Durchgängen mehr und mehr Routine. Am Anfang musste ich mich mehr auf die richtige Handhabung konzentrieren als auf den eigentlichen Rüstvorgang.“ (VP04)
 - „Mit der Brille lernt man den Rüstprozess schneller als mit der schriftlichen Anweisung. Nur mit den Videos konnte ich wirklich nachvollziehen, welches Bauteil wohin gehört.“ (VP16)

12. Leistungsbewertung in Abhängigkeit der Unterstützungsart (37 codierte Segmente)

- „Der Umgang mit der HoloLens ist mir am Anfang ein bisschen schwer gefallen. Dann hat auch der Rüstvorgang ein wenig gelitten, indem ich zum Beispiel nicht genau darauf geachtet habe, den Dorn richtig aufzuschrauben. Ich habe mich mehr auf die richtige Versuchsdurchführung konzentriert, sodass ich am Anfang automatisch mehr Fehler gemacht und auch mehr Zeit gebraucht habe.“ (VP04)
- „Ich hatte immer das Gefühl, dass es mir schwerer gefallen ist, die Aufmerksamkeit ohne Brille zu halten. Vor allem im zweiten Durchgang ohne Brille. Mit der Brille hat man das Gefühl, dass man mehr auf Sendung ist. Auch dadurch, dass man ständig am „Klicken“ ist. Deswegen glaube ich auch, dass man mit der HoloLens weniger Fehler macht.“ (VP21)

13. Arbeitssicherheit (28 codierte Segmente)

- „Die Orientierung [mit der Brille, Anm.] ist ein bisschen schwierig. Bei der Montage dachte ich oft: Wo stoß ich jetzt an? Da fühlt man sich zum Beispiel ohne HoloLens sicherer. Mit der HoloLens tastet man sich langsam an die Umgebung heran, da man diese nicht so gut wahrnimmt.“ (VP04)
- „Jeden Tag mit der Brille irgendwas rüsten, dafür nervt die Brille immer noch zu viel. Da sie vor allem auch zu schwer ist. Du weißt nicht genau: Knalle ich jetzt da irgendwo gegen? Wenn du in einer Presse zum Rüsten bist, weißt du manchmal nicht: Wo bin ich jetzt?“ (VP07)

14. Strategien zur Ausführung der Arbeitsaufgabe (16 codierte Segmente)

- „Die Strategie ist ja letztendlich das Ganze möglichst richtig durchzuführen, also ohne Fehler und möglichst sicher. In der Industrie hat man natürlich auch einen zeitlichen Aspekt, also will man ja auch nicht den ganzen Tag brauchen, um einmal zu rüsten. Sondern es soll ja schon schnell gehen, ohne dass sich jemand dabei verletzt. Da muss man natürlich irgendwie den optimalen Punkt finden. Umso mehr man da vom System unterstützt wird, desto besser. Natürlich nur so lange, dass es einen nicht an der Arbeit hindert oder man zu viel lesen oder wahrnehmen muss.“ (VP11)
- „Ich habe mich immer als erstes von links nach rechts durchgearbeitet und erst einmal geschaut: Wo an der Maschine geht es jetzt? Oder worum geht es überhaupt? Dann habe ich mir die ‚Zutaten‘, die ich brauchte, also die einzelnen Werkzeuge herausgesucht und anschließend das Video angesehen. Ich habe mich dann immer gefragt: Wie muss ich das jetzt genau machen? Welche Handgriffe sind erforderlich? Und habe meine Vorgehensweise dann auf der Grundlage der Informationen kopiert.“ (VP06)

15. Anonymität der Daten (5 codierte Segmente)

- „Im Prinzip ist das mit der Brille so, wie wenn man eine Kamera ins Büro hängt und schaut, was derjenige macht. [...] Und dann ist das natürlich schon ein Punkt, der angesprochen werden müsste.“ (VP03)
- „Klar, durch die Messungen werden jetzt natürlich zum einen persönliche Daten erhoben, was ich nicht als sehr schlimm erachte. Zum anderen kann man aber durch die Nutzung der HoloLens genau beobachten, wer wie arbeitet und was er ansonsten noch so macht.“ (VP20)

16. Verbesserungsaspekte hinsichtlich des Versuchsaufbaus, der Applikation, des Endgerätes und der AR-Technologie (37 codierte Segmente)

- „Wenn man jetzt die Funktion und die Qualität der HoloLens vielleicht auf eine Brille bekommt, die etwas smarter, etwas kleiner ist und nicht so ganz wuchtig auf dem Kopf sitzt, dann würde man die Leute noch ein bisschen weniger einschränken oder belasten.“ (VP11)
- „Also der Kontrast ist nicht wirklich gegeben und die Darstellungsqualität nicht optimal. Man wird nämlich ein bisschen durch diese versteckten Kanten gestört.“ (VP07)

17. Weitere potenzielle Einsatzgebiete AR-basierter Datenbrillen (18 codierte Segmente)

- „Die Qualitätskontrolle wäre auch geeignet. Wenn du ein Referenzbild hinter das zu prüfende Objekt legen würdest und [...] dir dann eine Rückmeldung gegeben wird: passt, wird grün; passt nicht, wird rot. Auch beim Kommissionieren von Teilen kann man die Brille nutzen.“ (VP07)
- „Videoanrufe würden sich perfekt dafür [Einsatz AR-basierter HMD, Anm.] eignen. Zum Beispiel, wenn der Monteur eine Frage hat, kann er den Ingenieur bzw. seinen Chef anrufen, der sich das dann anschaut.“ (VP10)

8.6.3 Leistungsbewertung

Während die Datenreihen zur zeitlichen Dauer der Rüstvorgänge (z. B. $KS_{PI, V1} = 0,136$, $p_{PI, V1} > 0,200$; $SW_{HLV, V2} = 0,177$, $p_{HLV, V2} = 0,051$) einer Normalverteilung unterliegen, sind diejenigen zur Fehleranzahl innerhalb der Arbeitsausführung nicht normalverteilt (z. B. $KS_{HLf, V1} = 0,225$, $p_{HLf, V1} = 0,003$; $SW_{PI, V2} = 0,359$, $p_{PI, V2} < 0,001$).

Die Nutzung der HoloLens hat im Vergleich zur Rüstprozessdurchführung mithilfe der Papierinstruktion signifikante Auswirkungen auf die zeitliche Dauer des Rüstprozesses, wie am Beispiel des variablen Fenstermodus der Datenbrille sowohl im ersten ($M_{PI, V1} = 11:37 \pm 04:03$, $M_{HLV, V1} = 15:07 \pm 06:06$, $t = -2,696$, $p = 0,026$, $d = 0,550$) als auch im zweiten Versuchsabschnitt ($M_{PI, V2} = 08:37 \pm 03:28$, $M_{HLV, V2} = 09:55 \pm 02:14$, $t = -2,336$, $p = 0,029$, $d = 0,477$) ersichtlich wird (siehe Abb. 8.61). Die durchschnittliche Rüstzeit betrug mithilfe der Papier-Instruktion 10:07 ($\pm 03:46$) Minuten. Mithilfe des Unterstützungssystems benötigten die Probanden im Mittel eine Rüstzeit von 12:16 ($\pm 03:41$) Minuten. Eine Gegenüberstellung der beiden Rüstabschnitte legte dar, dass die Rüstzeiten sowohl ohne ($M_{PI, V1} = 11:37 \pm 04:03$, $M_{PI, V2} = 08:37 \pm 03:28$, $t = 4,790$, $p = 0,006$, $d = 0,978$) als auch bei Nutzung des HMD gleichermaßen im örtlich gebundenen ($M_{HLf, V1} = 14:21 \pm 04:34$, $M_{HLf, V2} = 09:39 \pm 01:52$, $t = 5,605$, $p = 0,006$, $d = 1,144$) sowie im Tag-along-Modus ($M_{HLV, V1} = 15:07 \pm 06:06$, $M_{HLV, V2} = 09:55 \pm 02:14$, $t = 5,134$, $p = 0,006$, $d = 1,048$) signifikant und effektstark abnehmen.

Während im ersten Versuchsdurchgang noch etwa zwei Fehler pro Versuchsperson ($M_{V1} = 2,2 \pm 1,4$) verursacht wurden, ist die Fehlerzahl im zweiten Versuchsdurchgang insgesamt deutlich geringer ($M_{V2} = 0,4 \pm 0,6$). In Bezug auf die unterschiedlichen Durchführungsarten, d. h. die Papierinstruktion ($MD_{PI, V1} = 3$, $MD_{PI, V2} = 00$, $z = -3,869$, $p = 0,006$, $r = 0,790$), den fixierten Fenstermodus der HoloLens ($MD_{HLf, V1} = 1$, $MD_{HLf, V2} = 0$, $z = -3,446$, $p = 0,006$, $r = 0,703$) und den variablen Unterstützungsverlauf des HMD ($MD_{HLV, V1} = 2$, $MD_{HLV, V2} = 0$, $z = -3,592$, $p = 0,006$, $r = 0,733$), kann diesbezüglich ein signifikanter und effektstarker Rückgang erfasst werden. In diesem Zusammenhang wurde allerdings auch deutlich, dass die Anwendung des

HMDs im direkten Vergleich zur Rüstvorgangsausführung ohne Datenbrillen-Nutzung keinen inferenzstatistisch signifikanten Einfluss auf die Fehlerverursachung hat – weder im ersten ($MD_{PI, V1} = 3$, $MD_{HLf, V1} = 1$, $z = -2,105$, $p = 0,105$, $r = 0,430$) noch im zweiten Rüstabschnitt ($MD_{PI, V2} = 0$, $MD_{HLv, V2} = 0$, $z = -1,508$, $p = 0,264$, $r = 0,308$). Die deskriptive Statistik zeigt, dass die Probanden mit der Datenbrille im Gesamtdurchschnitt zwar 17,5 % mehr Rüstzeit benötigten, jedoch eine um 63,5 % reduzierte Fehlerquote aufweisen. Hinsichtlich der beiden Versuchsabschnitte wurde die Fehlerzahl bei Anwendung des „Expert to Go“ im Zuge der Tag-along-Anwendung um 91,5 % (HL_f: 80,6 %) und die Rüstzeit um 34,5 % (HL_f: 32,8 %) verringert. Die Fehler- bzw. Zeitreduktion betrug im Zuge der papierbasierten Rüstdurchführung 74,6 % bzw. 25,8 %. Sämtliche Erkenntnisse können auch den Abbildungen 8.62, 8.63 und 8.64 entnommen werden.

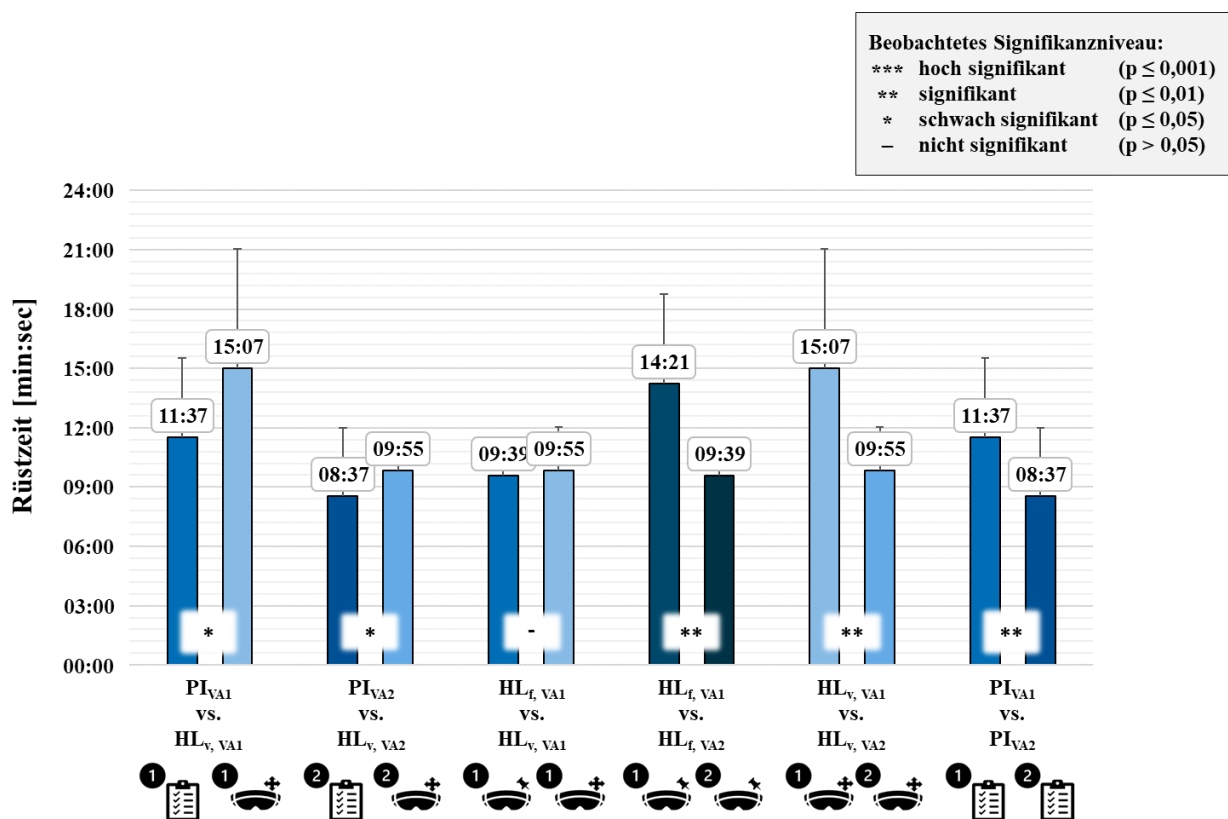


Abb. 8.61: Rüstzeiten während der unterschiedlichen Durchführungsmodi

Insbesondere im Zuge der Montage der symmetrischen Werkzeuge wurden vermehrt Montagefehler begangen, die zudem mit einer in Bezug auf die gesamte Tätigkeit erhöhten Rüstzeit einhergingen. Neben der logistischen Tätigkeit, die durch die Vielzahl der bereitzustellenden Werkzeuge mit einem erhöhten Fehlerpotenzial behaftet war, montierten die Probanden die innere Spannbacke (Rüstschritt #5), den Schieber (Rüstschritt #8) und die Platte zur Klemmkraftübertragung (Rüstschritt #9) im Vergleich zu den übrigen Rüstschritten vermehrt fehlerhaft, wenngleich durchschnittlich nicht mehr als ein Fehler pro Rüstschritt aufgetreten ist. Diese Erkenntnis kann

für sämtliche Durchführungsmodi am Beispiel des ersten Versuchsabschnittes der Abbildung 8.64 entnommen werden. Entsprechende Montagefehler sind mehrheitlich dadurch gekennzeichnet, dass das Werkzeug nicht an der vorbestimmten Soll-Position montiert wurde. Diese Rückmeldung wurde neben der manuellen Kontrolle des Versuchsleiters durch eine zum Abschluss des Rüstvorgangs erfolgte Aufnahme der 3D-Kamera bestätigt.

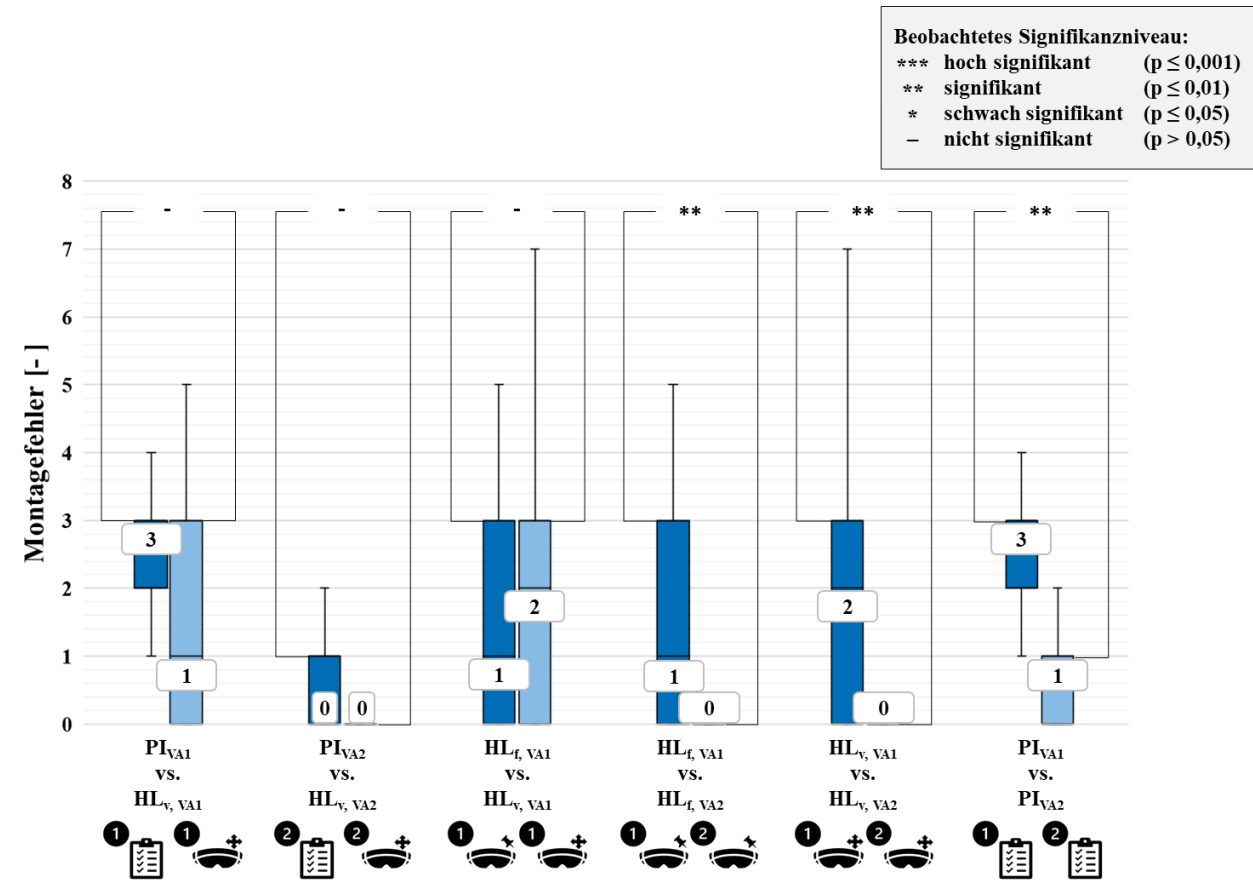


Abb. 8.62: Montagefehler während der unterschiedlichen Durchführungsmodi

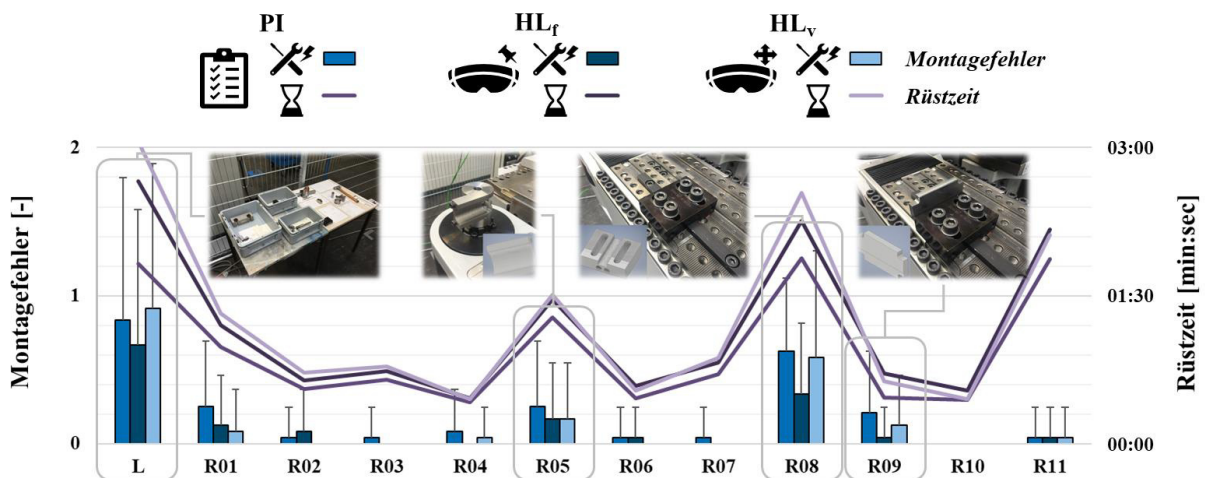


Abb. 8.63: Gemittelte Montagefehler und Rüstzeiten während der einzelnen Tätigkeiten

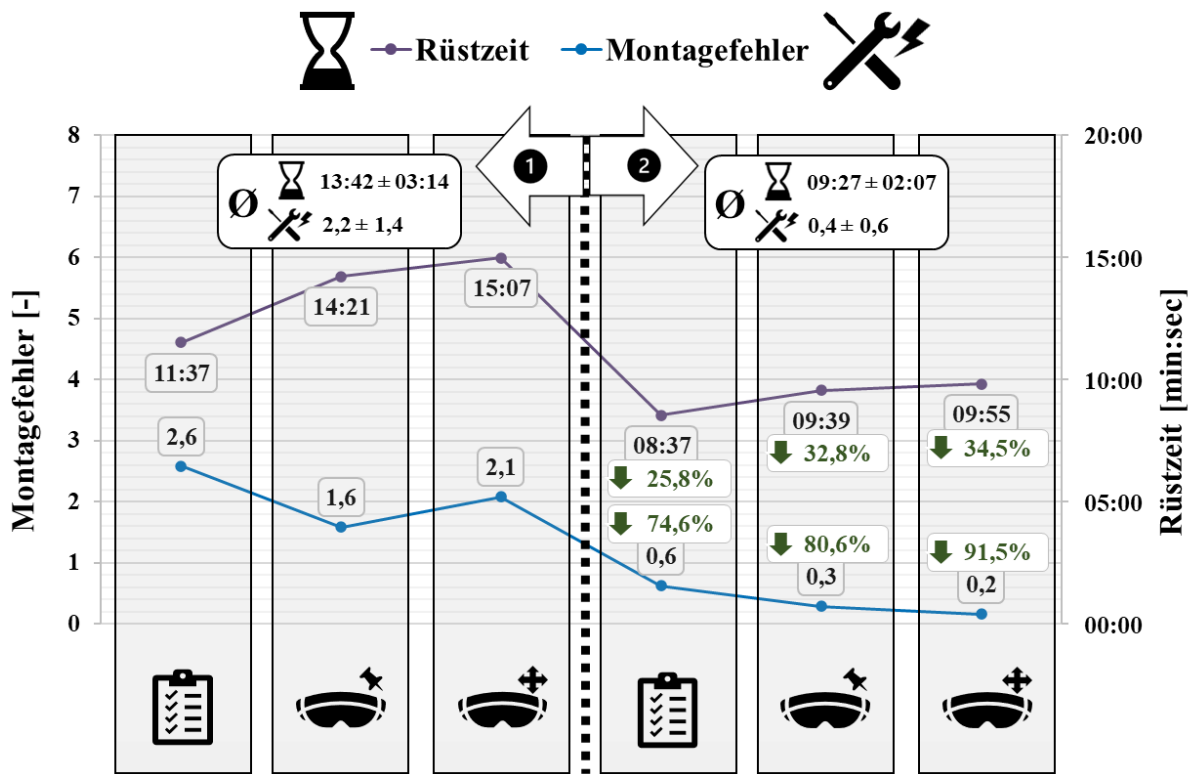


Abb. 8.64: Montagefehler und Rüstzeiten im Zuge der einzelnen Durchführungsmodi während des ersten Versuchsabschnittes

9 Diskussion der Ergebnisse

Die in Kapitel 8 beschriebenen Forschungsergebnisse werden unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen nachfolgend diskutiert. Diese sind dabei insbesondere hinsichtlich einer nutzerzentrierten, interaktions-ergonomischen und kompatiblen Gestaltung sowie in Bezug auf die durch die Nutzung eines wissensbasierten Cyber-Physischen Systems hervorgerufene Beanspruchung – sowohl subjektiver als auch objektiver Art – zu analysieren. Basierend auf dieser Erkenntnisbasis werden die formulierten Forschungshypothesen verifiziert oder falsifiziert. Neben der Herausstellung der praktischen Relevanz der Ergebnisse werden darüber hinaus Limitationen der durchgeführten Studien bzw. Einflussfaktoren auf die empirische Feldstudie und die experimentellen Laborstudien beschrieben.

9.1 Nutzerzentrierte und ergonomische Gestaltung wissensbasierter Unterstützungssysteme

Die Entwicklung interaktiver Systeme, die den Bedürfnissen der Nutzer gerecht werden, sich in ihre (Arbeits-)Praktiken einbetten oder die Entwicklung verbesserter Praktiken fördern können, stellt einen umfangreichen und komplexen Prozess dar. Neben einer engen Kooperation zwischen den verschiedenen Interessengruppen, einem genauen Verständnis des sozialen, kulturellen und organisatorischen Kontexts der Nutzer ist auch eine eindeutige Kommunikation zwischen allen kooperierenden Akteuren erforderlich, damit sämtliche Ansichten und Anforderungen in dem zu entwickelnden System bestmöglich implementiert sind. Die Ausarbeitung zeigt beispielhaft auf, wie die Konzeptionierung eines CPPS mithilfe des Forschungsparadigmas des Grounded Design bzw. zugehöriger praxistheoretischer Methoden und Techniken erfolgen kann. Weiterhin stellt sie eine Möglichkeit dar, z. B. durch die Verwendung von Modellen, Szenarien oder Storyboards, eine Brücke zwischen Entwicklern und Nutzern zu schlagen, sodass qualitative Daten, auch unter Berücksichtigung ergonomischer Richtlinien, zielgerichtet und zum Verständnis sämtlicher Akteure in relevanten Designimplikationen resultieren. Diese Zielsetzung verhilft zur Unterstützung der Maschineneinrichter bei einem zeitkritischen Produktionsprozess: dem Einrichten von Industriemaschinen. Die Forderung der Hypothese **H1, dass AR-basierte CPPS, die nutzerzentrierten und interaktions-ergonomischen sowie kompatiblen Gestaltungsrichtlinien folgen, Arbeitnehmer im Zuge industrieller Rüstprozesse unterstützen, indem sie zu einem leistungsfördernden Wissenstransferprozess in der alltäglichen Praxis beitragen**, wird erfüllt und kann somit verifiziert werden.

9.1.1 Aspekt „Wissen“

Die Ergebnisse zeigen, dass industrielle Rüstvorgänge sehr wissensintensive und komplexe Prozesse darstellen. Nur zwischen implizitem und explizitem Wissen bzw. „Know how“ und „Know why“ zu unterscheiden, reicht nicht aus (vgl. SCHMIDT, 2012). Wissen existiert innerhalb der Situationen, in denen man es zu explizieren versucht (vgl. SACKS, 1995). Die Detailgenauigkeit und die Bereitschaft Wissen zu teilen, variiert in Abhängigkeit der beteiligten Akteure. Daher sollte Wissen in prozessrelevante Elemente spezifiziert und mit begleitenden technologischen Maßnahmen zum Wissenstransfer gestützt werden. Zwar ähneln die Erkenntnisse hinsichtlich des Transfers von Wissen denen aus Studien anderer Fachgebiete, wie z. B. über Diagnose- oder Pflegetätigkeiten in medizinischen Arbeitsumgebungen (vgl. BARDRAM & BOSSEN, 2005), allerdings grenzen sich die hier dargestellten Ergebnisse davon ab. Das Wissen konzentriert sich auf wenige Personen innerhalb einer Organisation. Wenn das Wissen dieser Personen nicht greifbar ist, bspw. durch Krankheit oder Ausscheiden aus dem Unternehmen, können für das Unternehmen prozessbezogene und ökonomische Defizite entstehen.

Designimplikationen für ein AR-basiertes CPPS, das im beschriebenen Rüstkontext eingesetzt und zu einem effizienten Wissenstransfer seitens der Maschineneinrichter beitragen soll, wurden bisher insbesondere hinsichtlich verkörperter Handlungen noch nicht umfassend erforscht. Der vorliegende Forschungsansatz zielte darauf ab, den diesbezüglichen Stand der Technik voranzutreiben. Die aus den empirischen Untersuchungen gesammelten Erkenntnisse trugen maßgeblich zur Technologieauswahl und zum Design des Unterstützungssystems bei. Neben einer schrittweisen, modularen und einfachen Darstellung und Durchführung der Rüstinstruktionen ist insbesondere die Mobilität der AR-Technologie, z. B. in Form einer Datenbrille, von großer Bedeutung, um unmittelbar am Prozessort situativ unterstützen zu können. Externe Sensoren dienen darüber hinaus zur Prozesssicherheit, bspw. zur Überprüfung von Werkzeugpositionen oder Vermeidung von Werkzeugkollisionen. Virtuelle Simulationen helfen dem Nutzer zudem in (Arbeits-)Situations, in denen eine erhöhte Komplexität oder eine unzureichende Anzahl realer Produktionsdaten vorliegt. Durch eine große Variabilität der Rüstvorgänge und der damit einhergehenden Individualität der mitarbeiterspezifischen Vorgehensweise sollten stets Möglichkeiten zur Anpassung bzw. Optimierung bestehender Anweisungen geboten werden. Design und Sensorik unterstützen Bediener dabei, verschiedene Rüstscenarien unterschiedlicher Präsentationsformate (Texte, Bilder, Videos und AR-Overlays) kontextspezifisch zu erfassen, zu verarbeiten und zu visualisieren, um darauf aufbauend Lern- und Verbesserungsprozesse anzustoßen. Mechanische Arbeitsschritte weisen zumeist prozessuale Wissensbestandteile auf, die durch verkörperte Handlungen repräsentiert werden. Nicht-mechanische Rüstvorgänge können durch das Vorhandensein respektive die Darstellung von propositionalem Wissen beschrieben werden. Wissen, das vermeintlich irrelevant,

selbstverständlich und banal erscheint, jedoch oftmals elementare Erfahrungswerte beinhaltet, kann durch die CPPS-Systematik auf Grundlage der sensorischen Informationen mitsamt einer kontextualisierten Visualisierung verfügbar gemacht werden. Der Einsatz von AR erlaubt es dem Nutzer in diesem Zusammenhang, digitale und reale bzw. physische Inhalte zu kombinieren. Die Infrastruktur der Daten und Speichermedien muss dabei jeweils an spezifische Situationen und den organisatorischen Rahmen anpassbar sein, damit relevante Instruktionen in den situativen Kontext eingebettet werden können. Somit können durch die Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit und Aktualität der Informationen Trial-and-Error-Phasen verkürzt und reduzierte Rüstzeiten generiert werden. Zu erwähnen ist an dieser Stelle außerdem, dass der Trend zur Dokumentation jedoch nicht dazu führt, dass Arbeitnehmer entbehrlich werden. Die Forschungsarbeit hat gezeigt, dass Organisationen erfahrene Arbeitskräfte vielmehr wertschätzen und versuchen, sie an das Unternehmen zu binden.

Ein für die Entwicklung des Wissenstransfermodells entscheidender Schritt war die Identifizierung relevanter Akteure und die Erläuterung, wie sich die gemeinsame Nutzung von Wissen auf ihre Aktivitäten innerhalb des Rüstprozesses unter Berücksichtigung sozialer, organisatorischer und situativer Aspekte bezieht. Der Mensch stellt den Dreh- und Angelpunkt des Wissenstransfers dar. Wie in Abbildung 8.5 dargestellt, findet ein Austausch von Wissen zwischen mindestens zwei Akteuren statt: einer wissenden Person und der Person, die von ihr lernt (vgl. NONAKA & VON KROGH, 2009). Entweder kann ein Wissenssuchender eine wissende Person aufgrund seines bestehenden Wissensbedarfs bewusst aufsuchen (Pull-Prinzip) oder eine wissende Person erkennt einen potenziellen Bedarf des Wissenssuchenden und sieht sich im Stande, diesen mit Wissen zu versorgen (Push-Prinzip).

Die in diesem Zusammenhang stattfindenden Lernprozesse werden in erster Linie durch direktes, unmittelbares und persönliches Feedback gesteuert. Mit Hilfe des Feedbacks ist es möglich, die jeweilige Tätigkeit zu reflektieren. Nach BANKER et al. (1993) führt dieser Sachverhalt zu „Know why“, der wiederum eine Phase im Lernprozess anstößt, in der autonomes Lernen das persönliche Feedback weitgehend ersetzen kann. An einem bestimmten Punkt wurde genug verstanden, um ein abstraktes Verständnis der Vorgänge aufzuweisen, das auf eine Vielzahl von Situationen im Produktionsprozess angewendet werden kann. CPPS setzen daran an, indem das Feedback aus dem System selbst konsumiert wird und ortsunabhängig ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Bedeutsamkeit des Verständnisses physikalischer Prinzipien, die den grundlegenden Mechanismen des Rüstprozesses zugrunde liegen. Dieser Aspekt deckt sich mit der Auffassung der CLT zur Aneignung der „Germane load“, um das Wissen auf andere, ähnliche Prozesse zugunsten einer kognitiven Belastungsreduktion zu übertragen.

9.1.2 *Aspekt „Design“*

Ein nutzerzentrierter und partizipativer Designansatz erfordert, dass die Ergebnisse der eingehenden qualitativen Studien zum Verständnis der Kontexte und Praktiken der Nutzer allen beteiligten Akteuren eindeutig vermittelt und zugänglich gemacht werden (vgl. BJÖGVINSSON et al., 2012; BJÖGVINSSON et al., 2010). Modellierungstechniken oder praxisbezogene Aufgabenmodelle, wie das beschriebene CTT-Modell, können eine wertvolle Ressource sein, um umfangreiche qualitative Daten in eine prozess- und praxisbezogene Darstellung zu abstrahieren, welche die Entwicklung des Systems aus Sicht der Designer bzw. Entwickler unterstützen soll. Neben konzeptionellen Möglichkeiten werden auch kontextbezogene Einschränkungen vermittelt. Verschiedene (Rüst-)Szenarien waren weiterhin sehr nützlich, um die Studienteilnehmer im Zuge der Designaktivitäten und -workshops zu involvieren.

Zur technologischen Vermittlung von rüstspezifischem Wissen in Bezug auf die Einrichtung von Industriemaschinen wurde auf eine AR-basierte Unterstützungsform zurückgegriffen, die zur Erstellung und Wiedergabe von prozessrelevanten Inhalten verhilft. Bisherige Studien zur AR-basierten Unterstützung innerhalb von Fertigungsprozessen konzentrieren sich in der Regel auf Laborexperimente und vernachlässigen mögliche Auswirkungen der natürlichen Umgebung auf die Nutzung und Leistung der Technologie (vgl. BHATTACHARYA & WINER, 2019). Das vorliegende Forschungsdesign kombiniert sowohl einen qualitativen als auch einen quantitativen Ansatz zur Untersuchung des Wissenstransfers und der Konzeptionierung von Lehrinhalten im Produktionskontext, der durch AR-basierte CPPS-Technologie unterstützt wird.

Erstellen von Rüstinstruktionen

Die praxis- und branchenorientierte Evaluierung hat gezeigt, dass Arbeitnehmer bzw. Maschineneinrichter stark motiviert sind, sowohl Instruktionen zu erstellen als auch eine verfügbare Dokumentation der Anweisungen zu nutzen. Der hohe zeitliche Aufwand für die Erstellung von Instruktionen bedingt, dass die entsprechenden Nutzer zukünftig mit weniger Unterbrechungen konfrontiert werden. Folglich sind sie in der Lage, sich besser zu konzentrieren und persönliche Arbeitsaufgaben zu erledigen (vgl. SPEIER et al., 1997), obwohl der Schwerpunkt im Produktionsumfeld auf Anleitungen in Papierform gelegt wurde, die in ihrer physischen Herstellung zwar günstiger sind, sich jedoch in industriellen Umgebungen sowohl bei der aktualitätsgetreuen Erstellung als auch bei einer adäquaten Handhabung als umständlich und durch die damit einhergehende Vereinnahmung von Kapazitäten auch als kostenintensiver erweisen.

Die Erstellung von Lehrinhalten umfasst sowohl operative Elemente (z. B. verwendete Werkzeuge) als auch strategische Elemente (z. B. Präsentationsart der Inhalte), die in ihrer Gesamtheit und durch ihre fehlende Stringenz zu Unsicherheiten seitens der Anwender führen können (vgl. FUNK et al., 2016). Diese Unsicherheiten können im Zuge der Aufgabenbewältigung wiederum in stark schwankende Ausführungszeiten und Fehlerquoten resultieren. Daraus ergibt sich ein Bedarf an wissensbasierten Tools zur Unterstützung der Beschäftigten. Ein Vertrauen in derartige Hilfssysteme kann nur dadurch aufgebaut bzw. erreicht werden, indem mithilfe einer geeigneten Autorenumgebung wesentliche Inhalte für verschiedene Informationsebenen geschaffen werden (vgl. KELTON et al., 2010). Das bedingt die Verwendung von Animationen und bild- bzw. videobasierter Zusatzinformationen, aus denen die Montage des jeweiligen Werkzeugs inklusive der zugehörigen Auflageflächen und Befestigungspunkte ersichtlich wird.

Animationen verhelfen im Zuge der Rüstvorgänge zu einer vergleichenden Darstellung einer virtuellen Repräsentation an die reale Tätigkeit (vgl. RZAYEV et al., 2018; NEWELL et al., 2014). In der Literatur wird vornehmlich auf die Erstellung 3D-basierter Inhalte Bezug genommen (vgl. NEBELING & MADIER, 2019; MACINTYRE et al., 2005). Im Rahmen werkzeuggestützter Rüstvorgänge sind 3D-Daten in Form von CAD-Daten der Werkzeuge oftmals vorhanden, müssen jedoch in Ergänzung dazu animiert und sequenziert werden.

Sofern detaillierte Informationen durch virtuelle respektive animierte 3D-Daten nicht eingesehen werden können, werden Zusatzinformationen in Form von Bildern und Videos genutzt. Ähnliches gilt, wenn die Platzierung der Hologramme aufgrund der räumlichen Darstellung der HoloLens nicht genau genug ist. Die mangelnde Genauigkeit von Hologrammen kann durch Videos effektiv ergänzt werden. Während Hologramme grundlegende Inhalte präsentieren, können Bilder und Videos die exakte Handhabung einzelner Komponenten visualisieren. Zudem können Videos mit der vorhandenen Hardware schnell und einfach produziert werden. Allerdings sind dem Einsatz von Videos auch Grenzen gesetzt, da durch erhöhte Ausführungszeiten die „Performance“ des Rüstvorgangs leidet.

Mithilfe der durch einen erfahrenen Nutzer bzw. einen „Experten“ generierten Inhalte kann eine im Vergleich zu einer persönlich geführten Lernsituation ähnlich vertrauensvolle Lernumgebung geschaffen werden (vgl. BÜTTNER et al., 2020). Die Gestaltung von Rüstweisungen sollte die Arbeitsabläufe sowohl auf Seiten der erfahrenen Maschineneinrichter als auch auf Seiten der unerfahrenen „Novizen“ möglichst geringfügig stören (vgl. SPEIER et al., 1997). Um dieses Ziel zu erreichen und eine möglichst autonome Lernumgebung zu schaffen, ist es notwendig, dass die Anleitungen den beschriebenen Detaillierungsgraden entsprechen (vgl. BRESCIANI & EPPLER, 2009; PAAS et al., 2003) und sowohl für Experten als auch für Novizen angepasst werden können

(vgl. KALYUGA et al., 2003). In diesem Zusammenhang besteht die Rolle der Technologie darin, eine Umgebung für die schnelle Erstellung von Anleitungen durch erfahrene Personen zu schaffen (vgl. NEBELING & SPEICHER, 2018), um somit ressourcenschonend bestehende Praktiken zu vermitteln (vgl. BLOODGOOD & SALISBURY, 2001).

Wiedergabe von Rüstinstruktionen

Trotz der vertrauenswürdigen und inhaltlich fundierten Darstellung der durch die HoloLens in einer Autorenumgebung generierten Inhalte kann das von Experten aufgezeichnete Wissen nicht vollumfänglich und entsprechend adäquat wiedergegeben werden. Die von erfahrenen Maschineneinrichtern hinterlegten Anleitungen bieten durch ihre Individualität Raum für potenzielle Verbesserungen. Für eine entsprechende Optimierungsanalyse erweisen sich insbesondere Prozessdaten in Form von Rüstzeiten und Rüstwegen als vorteilhaft. Das kollaborative Editieren von Rüstschritten greift diese Idee zwar auf, durch die Nutzung eines Tablet-Clients jedoch zulasten eines Medienbruchs. Entsprechende Informationen sollten direkt in der Autorenumgebung erfasst und anschließend mit Rüstexperten zu einem optimierten Rüststandard zusammengeführt werden (vgl. BHATTACHARYA & WINER, 2019). Ein allgemeingültiger und nahezu optimaler Standard ist durch die Anwendung der vorgestellten CPPS-Rüstunterstützung für den Wissenstransfer von Vorteil. Die Möglichkeit der einfachen Darstellung von Rüststandards wird allerdings kritisch betrachtet, wenn ein Lernprozess von unerfahrenen Maschineneinrichtern verhindert wird. *TNI8* weist darauf hin, dass ein gedankenloser Konsum von Inhalten nicht zum Wissensaufbau beiträgt, da die ständige Verfügbarkeit der Technologie einerseits die diskutierten Vorteile bietet und andererseits den Novizen an einer Verkörperung des Rüstvorgangs hindert, die für einen Lernprozess aber zwingend stattfinden muss. Vielmehr muss ein kontrollierter Umgang mit der Technologie erfolgen und ein Nutzungsplan oder eine Trainingsstrategie implementiert werden. Der Nutzer muss motiviert werden, die Technologie nur als temporäre Lösung zu sehen. Zwar bietet der Umgang der HoloLens einen spielerischen Effekt, allerdings können weitere bzw. umfassende Gamification-Ansätze und eine Kontrolle des Lernfortschritts zusätzliche Anreize zur Verinnerlichung der visualisierten Inhalte schaffen.

Die Überlagerung holografischer Visualisierungen mit den entsprechenden realen Elementen sollte einen unmittelbaren Vergleich der jeweiligen Komponenten zugunsten eines zeitnahen visuellen Feedbacks darstellen. Dieser Umstand verhilft zur Erleichterung des Verständnisses der Instruktionen. Arbeitspersonen neigen allerdings dazu, entsprechende Visualisierungen negativ zu empfinden, sofern deren Genauigkeit nicht ausreichend ist. Durch die noch nicht vollumfänglich

ausgereifte Technologie der ersten Generation der HoloLens merkten die Probanden auch diesbezüglich Differenzen an. Zusätzliche sensorische Überwachungsoptionen können helfen, diese Problematik abzuschwächen, da eine sofortige Rückmeldung über sämtliche ausgeführte Tätigkeiten angestrebt wird (vgl. HERMSEN et al., 2016; GOOMAS, 2012). Somit ist ein direktes Feedback möglich (vgl. GOOMAS et al., 2011). Die unmittelbare Rückmeldung innerhalb der Handlungsreflexion ist im Vergleich zu einer Reflexion über die Handlung effektiver (vgl. DARBY, 2006). Insgesamt wurden die auf CAD-Daten basierenden Hologramme als sehr detailliert wahrgenommen, da die wichtigsten geometrischen Informationen enthalten sind. Je feiner sich die Hologramme in die Umgebung der Maschine einbetten lassen, umso besser werden die Anweisungen konsumiert. Aufgrund eines durch die HoloLens ausgelösten hohen Immersionsgrades besteht die Gefahr, dass die Wahrnehmung der Peripherie insbesondere bei komplexen Fertigungsmaschinen, wie z. B. bei Spezialmaschinen zur Herstellung von flexiblen Metallschläuchen, eingeschränkt wird. In solchen Fällen muss der Sicherheit des Benutzers Rechnung getragen werden, bspw. durch eine sensorische Überwachung des Arbeitsraums mithilfe einer 3D-Kamera.

9.1.3 (Interaktions-)Ergonomie und Kompatibilität

Die Bedienerführung moderner Endgeräte, Anlagen und Maschinen nimmt durch den nach wie vor fortschreitenden digitalen Wandel einen großen Stellenwert ein. Neben der Gebrauchstauglichkeit, der Bedienbarkeit und der Verständlichkeit sind auch die Erlernbarkeit sowie eine starke Verzahnung von Aktion und Reaktion wesentliche Aspekte für eine der menschlichen Informationsverarbeitung zuträglichen Gestaltung moderner Systeme.

Dass im Zuge der Formulierung der Designimplikationen und der Hardware-Auswahl wesentliche ergonomische Kriterien beachtet wurden, zeigt ein Vergleich mit einer Ausführung von D'AMATO et al. (2022). Die Forscher fassen wesentliche ergonomische Anforderungen an ein AR-basiertes HMD zusammen. Zwar beziehen sie sich explizit auf den Bereich der Chirurgie, betonen aber deren Schlüsselfunktion für die betriebliche Implementierung zur Unterstützung genereller manueller Tätigkeiten im peripersonalen Raum. Die HoloLens der ersten Generation erfüllt einige dieser Anforderungen. Neben der Möglichkeit zusätzlich zum HMD auch eine eigene optische Brille tragen zu können, wird das HMD auf dem Kopf des Anwenders derart fixiert, dass ein Verwackeln nicht zu erwarten und der Einsatz beider Hände gewährleistet ist. Weiterhin hat der Nutzer die Möglichkeit, seine individuelle Pupillendistanz zum binokularen Visier durch eine entsprechende Kalibrierungsfunktion automatisch einzustellen. Der Anwender ist außerdem in der Lage, das System auch in Situationen zu nutzen, in denen keine augmentierten Inhalte bezogen werden

müssen. Eine gänzlich uneingeschränkte Sicht auf den Arbeitsbereich ist durch das kleine Sichtfeld allerdings nicht gegeben. Darüber hinaus kann das Visier nicht gekippt werden. Diese beiden Gestaltungsaspekte wurden in der Nachfolgeneration der HoloLens behoben. Zwar wurde die Passform und die Gewichtsverteilung optimiert, allerdings reduzierte sich das Eigengewicht der HoloLens 2 im Vergleich zu ihrem Vorgänger nur marginal um 13 Gramm auf 566 Gramm. Nach D'AMATO et al. (2022) sollen „AR-Headsets“ jedoch nicht mehr als 350 Gramm Gewicht aufbringen, um Ermüdungserscheinungen infolge hoher Beanspruchung und damit eine Minderung der Arbeitsleistung vorzubeugen.

Augmented Reality wird unabhängig von ihrer ergonomischen Einbindung zunehmend zur Anleitung und Unterstützung bei Montage- und Rüstvorgängen sowie zur Fehlersuche in industriellen Umgebungen eingesetzt. Das entwickelte Unterstützungssystem hat gezeigt, dass Nutzer mithilfe der Applikation, mit der sie über das HMD bzw. die Microsoft HoloLens interagierten, im Vergleich zu herkömmlichen Instruktionsmaterialien, wie papier-basierten Anleitungen, verbesserte Arbeitsergebnisse erzielen, u. a. in Form einer minimierten Fehlerrate. Aufgrund der intuitiven Bedienung sowie der intensiven und konzentrierten Auseinandersetzung mit dem Unterstützungssystem setzt schnell ein Lerneffekt ein – sowohl hinsichtlich des Rüstprozesses als auch in Bezug auf den Umgang mit der Datenbrille und der Applikation. Die AR-Technologie verhilft in Kombination mit einer wiederholten Ausführung der Arbeitsaufgabe dazu, dass die kognitive Beanspruchung des Nutzers reduziert wird. Gleichzeitig beugt sie potenziell einsetzenden Konzentrationsnachlässigkeiten vor und unterstützt den Nutzer in Bezug auf die Erlangung respektive Weitergabe von prozessrelevantem Wissen.

Ohne eine menschenzentrierte und kompatible Gestaltung der Informationen hätten die im vorherigen Absatz genannten Erkenntnisse nicht generiert werden können. Einerseits unterstützt das vorgestellte System unerfahrene oder anzulernende Maschineneinrichter zugunsten eines prozesssicheren und fehlerminimalen Rüstvorgangs. AR-basierte Datenbrillen eröffnen zudem auch Menschen mit fachlichen Defiziten, geistigen und/oder körperlichen Beeinträchtigungen neue berufliche Perspektiven. Menschen mit geringer Prozesskenntnis oder hör- bzw. sehbeeinträchtigte Menschen können bspw. mit visuellen und auditiven Informationen unterstützt werden. Andererseits kann der aktuelle Forschungsstand (noch) keine signifikante respektive vollumfängliche Erfolgsgarantie derartiger Tools im betrieblichen Alltag ausweisen. Die Gesetzgebung macht für die Gestaltung neuartiger Visualisierungsarten und speziell für AR-basierte Informationsdarstellungen keine konkreten Vorgaben. Dieser Umstand ist u. a. der rasant fortschreitenden Technisierung ge-

schuldet. Gesetzliche Vorschriften (z. B. ArbStättV), Normen (z. B. DIN EN ISO 9241) oder Leitfäden (z. B. DGUV Information 215-410 oder 215-450) dienen vielmehr für die Gestaltung derartiger Unterstützungssysteme lediglich als übergeordnete und z. T. abstrakte Wegweiser.

Die vorliegende Ausarbeitung hat am Beispiel einer AR-unterstützten Rüstapplikation gezeigt, welche hardware- und software-ergonomischen Kriterien für eine nutzerzentrierte und v. a. interaktions-ergonomische Gestaltung für Informationsdarstellungen zum Tragen kommen. Für einen langfristigen, prozesssicheren, nachhaltigen und aus Sicht der Anwender akzeptierten Einsatz derartiger Systeme sind neben weiteren technologischen Optimierungen und Forschungsbestrebungen auch gesetzliche und konkrete normative Vorgaben unabdingbar. Dazu sind die Regelungen auf der Grundlage von weiteren Praxisbeispielen bzw. Anwendungsszenarien aus unterschiedlichsten Bereichen zu berücksichtigen, wie bspw. nicht-automatisierte (Fertigungs-)Prozesse, die nach wie vor einen elementaren Bestandteil von KMUs einnehmen.

9.2 Nutzungsinduzierte Beanspruchung durch AR-basierte Head-Mounted Displays

Ausgewählte Arbeitsplatzbewertungsverfahren und Messmethoden verhalfen in Kombination mit Verfahren zur Erfassung der subjektiven Einschätzung der Probanden dazu, eine nutzungsinduzierte Beanspruchung in Folge der Anwendung einer AR-basierten Datenbrille abzuleiten. Die in diesem Zusammenhang erlangten Erkenntnisse werden nachfolgend diskutiert.

9.2.1 Risikobewertung bzw. Gefährdungsbeurteilung

Die Durchführung von Rüstvorgängen an industriellen Fertigungsmaschinen stellen für die Maschineneinrichter eine vertretbare physische Belastung dar. Zwar sind kurze Rüstzeiten bzw. Maschinenstillstandszeiten grundsätzlich anzustreben, allerdings besteht eine naturgemäß hohe Taktzeit eines Rüstvorgangs, sodass i. d. R. eine moderate Arbeitsfrequenz resultiert. Während die anhand der LMM erfolgten Risikobewertungen eine Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung unwahrscheinlich erscheinen lassen, zeigt die EAWS-Analyse in beiden Anwendungsfällen, d. h. mit und ohne Nutzung der HoloLens, mögliche Risiken auf, die durch entsprechende Gestaltungsmaßnahmen beherrscht werden müssen. Die **AR-Anwendung führt nicht zu einer eindeutig höher einzuschätzenden Gefährdung am Arbeitsplatz**, sodass Arbeitshypothese **H2** falsifiziert werden kann.

Diese unterschiedlichen Ausprägungen sind einerseits durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Belastungsarten der Verfahren begründet. Andererseits wird eine differente Bewertungsart herangezogen. In den Leitmerkmalmethoden erfolgt eine mehrheitlich qualitative Einschätzung

der Tätigkeit, während das EAWS quantitative Regeln vorgibt. Am Beispiel der Haltungswertung zur Interaktion mit der Datenbrille wird deutlich, dass die LMM ein Greifen über Schulterhöhe und das EAWS ein Auslenken des Ellenbogens über Schulterhöhe referenziert. Während die einzelnen Rüstschritte in gleicher Weise durchgeführt werden, besteht der hauptsächliche Unterschied der Durchführungsarten in der Nutzung der Montageanleitungen. Diese sind entweder örtlich fixiert (Papierinstruktion) und bedingen eine Beugung des Oberkörpers oder folgen dem Sichtfeld des Nutzers (AR-Instruktion, Tag-along-Modus) und erfordern lediglich eine kurzweilige Auslenkung eines Oberarms. In der Bewertung wird allerdings von einer prozesssicheren Handhabung des Unterstützungssystem ausgegangen. Unerfahrene Nutzer benötigen möglicherweise mehrere Ausführungen für eine erfolgreiche Interaktion, sodass entsprechend längere Haltedauern und statische Haltearbeit resultieren können. Ein ähnlicher Aspekt tritt auf, wenn Maschineneinrichter Instruktionen, d. h. insbesondere das Video zum jeweiligen Montageschritt, wiederholt einsehen möchten. Da ein Werkzeug in der Regel erst nach initialer Konsumierung der Anleitung ergriffen und unmittelbar im Anschluss verbaut wird, ist ein dynamischer Ablauf vorherrschend. Ist sich eine Arbeitsperson nach diesen Ausführungen jedoch hinsichtlich eines montagerechten Einbaus nach wie vor unsicher, wird das Video-Material erneut bzw. mehrfach genutzt, sodass entsprechend statische Tätigkeiten durch das Halten des Werkzeugs entstehen.

Eine entscheidende Minderung des Risikopotenzials durch die Anwendung der HoloLens wird durch die Bewertung der Körperhaltung verdeutlicht. Die Wertung der Sektion ist zwar nicht ausschlaggebend für die Gesamtkörperwertung, allerdings besteht hier die größte Differenz der beiden Ausführungen. Durch das Tragen und die interaktive Nutzung der HoloLens resultieren während des gesamten Prozesses dynamische Haltungswechsel, die durch eine vornehmlich aufrechtere Körperhaltung gekennzeichnet sind. Folglich führen diese Sachverhalte im Vergleich zur papierbasierten Anwendung zu einer Verbesserung der Körperhaltungen und entsprechend einer verminderten Gefährdung am Arbeitsplatz.

Insbesondere das Bewertungsverfahren der EAWS-Analyse erreicht durch deren detaillierte Indexberechnungen einen hohen Genauigkeitsgrad des zu untersuchenden Arbeitsprozesses. Der ganzheitliche Detaillierungsgrad des EAWS-Tools überwiegt allerdings demjenigen der LMM. Die Bedeutung einer mehrstufigen Betrachtung des Arbeitsprozesses wird dadurch erneut unterstrichen. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass sich die Belastung des Muskel-Skelett-Systems des Einzelnen, hervorgerufen durch den Arbeitsprozess, je nach Alter, Geschlecht und Konstitution sowie individueller Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen der Arbeitspersonen unterschiedlich auswirkt. Die Bewertungsverfahren dürfen damit nur als Orientierungshilfe verstanden werden. Die Ergebnisse der Bewertungsverfahren des EAWS sowie der LMM

zeigen dennoch, dass Maßnahmen zur Gefährdungsprävention eingeleitet werden sollten. Der Arbeitsplatz ist in Kombination mit der Nutzung neuartiger Endgeräte konstruktiv (z. B. anwendergerechte Funktionsmaße der Arbeitselemente) und prozessual (z. B. verschwendungsfreie Rüstschritte durch Vermeidung unnötiger Materialbewegungen und Laufwege) so zu gestalten, dass deren Verwendung in einer möglichst neutralen Körperhaltung zugunsten einer geringen Risikobewertung erfolgen kann, um einer Schädigung des Muskel-Skelett-Systems vorzubeugen.

9.2.2 Objektive und subjektive Muskelbeanspruchung sowie Komfortbeeinträchtigungen

Die Analyse der objektiven Ergebnisse im Hinblick auf die durch die Nutzung eines AR-basierten Unterstützungssystems hervorgerufenen muskulären Beanspruchung zeigt, dass eine substanziell höhere Aktivierung der Schulter-Nacken-Muskulatur nur durch statische Blickpositionierungen und insbesondere innerhalb starker seitlicher Blickrichtungen festzustellen ist. Diese muskuläre Problematik ist jedoch, vergleichbar mit den Erkenntnissen von COMETTI et al. (2018), eher mit der generellen Bewegungsausführung als weniger mit dem Gewicht und den Abmessungen des HMDs verknüpft. Nichtsdestotrotz hat das mit 580 Gramm hohe Eigengewicht der HoloLens zumindest einen Einfluss auf das subjektive Empfinden der Nutzer, wie von NGUYEN et al. (2020) und LIN et al. (2018) bestätigt wird. Ein Großteil des Gewichts lastet auf der Stirn und der Nase des Nutzers, sodass er seinen Blick im Laufe der Zeit kontinuierlich bzw. stetig nach unten verlagert. Diese allmähliche Verlagerung der Körperhaltung kann daher zu Nackenverspannungen und allgemeinem Unbehagen führen. Die jeweils entgegen der Blickrichtung liegenden m. sternocleidomastoidei sind von einer relevant erhöhten Muskelaktivität betroffen, die gemäß ihrer Funktion für die Rotation des Kopfes zuständig sind. Die Mehrbeanspruchung im Zuge des Einsatzes der HoloLens ist neben den ergonomischen Limitierungen, d. h. das hohe Eigengewicht und die ungünstige, gesichtsseitige Gewichtsverteilung der HoloLens, im Wesentlichen durch das kleine Sichtfeld und die dazugehörige Interaktionsanforderungen der Datenbrille begründet. Der Cursor oder Gaze Point der Brille muss auf das Hologramm gerichtet sein, um interagieren zu können. Eine Austarierung mithilfe der Augen ist nicht möglich, da in der HoloLens der ersten Generation keine Eye-Tracking-Systematik verbaut ist. Somit muss der Nutzer die Montageanweisung bzw. die Projektionsfläche alleine durch Kopfbewegungen ansteuern. Eine entsprechende visuelle Rückmeldung war innerhalb der Versuchsdurchführung ohne das HMD nicht gegeben. Bei der Einführung in den Versuchsablauf erhielten die Probanden zwar die Anweisung, unabhängig der Durchführungsart die Augenbewegungen zur Erreichung der Zielposition möglichst zu vermeiden. Dies erfolgte jedoch auf rein subjektiver Basis durch das Probandenkollektiv. Dieser Umstand

könnte dazu geführt haben, dass insbesondere hinsichtlich der schweren Blickpositionen die jeweilige Bewegung nicht bis zum Äußersten durchgeführt worden respektive die Einschätzung bezüglich der Bewegungsausführung für das Probandenkollektiv schwerer gefallen ist. Das eingeschränkte Sichtfeld kann bei der Positionierung von Informationen in eher ungünstigen und unkomfortablen Bereichen zu einer höheren Muskelaktivität im Vergleich zu einer analogen Darstellung in Papierform führen, da die benötigten Informationen möglicherweise nicht mehr erfasst werden können.

Die Erkenntnisse von ROHMERT (1960) hinsichtlich statischer Muskelermüdung verdeutlichen, dass lediglich die im Zuge der ersten Teilstudie erfassten Messwerte der entgegen der Blickrichtung liegenden *m. sternocleidomastoidei* bei sehr starken seitlichen Kopfbewegungen mit ca. 23 % standardisierte Elektromyographische Aktivität deutlich oberhalb der 15-%-Grenze des Kapazitätsmaximums der jeweiligen Muskeln liegen, sodass Ermüdungserscheinungen im Rahmen der Nutzung der HoloLens bei einer länger andauernden Beanspruchung wahrscheinlich sind. Die elektromyographische Muskelaktivierung bedingt zwischen ca. 25 % bis 20 % eine nach einer Haltedauer von ca. vier bis sechs Minuten einsetzende Ermüdung. Die Werte der sich jeweils in Blickrichtung befindlichen oberen Stelle des *m. trapezius pars descendens* liegen bei derselben Blickposition nur wenige Prozentpunkte unter dem Grenzbereich. Bereits bei mittleren seitlichen Kopfbewegungen verschieben sich die Werte für die jeweilige Beanspruchung aller beobachteten Muskeln oder Muskelstellen in einen Bereich weiter unterhalb von 15 % der maximalen Kapazität der betreffenden Muskeln, sodass in diesem Zusammenhang keine Ermüdung in Folge der statischen Beanspruchung zu erwarten ist. Die Untersuchung der Montagetätigkeiten an verschiedenen Arbeitshöhen offenbarte indes keinen wesentlichen Unterschied zwischen der Nutzung bzw. Nicht-Nutzung der HoloLens. Die muskuläre Beanspruchung der untersuchten Muskeln wurde im Zuge der Datenbrillen-Verwendung durchschnittlich als „moderate“ bis maximal „starke“ Beanspruchung und im Rahmen der papierbasierten Durchführung als „keine“ Beanspruchung empfunden.

Derart lange statische Blickpositionierungen in Extrempositionen, die wesentlicher Bestandteil der ersten Teilstudie waren, sind im Realeinsatz, d. h. im Zuge industrieller Rüstvorgänge, mit großer Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Eine komfortable Positionierung der Projektionen, die keine schweren seitlichen Kopfauslenkungen provoziert, schafft in diesem Zusammenhang Abhilfe. Vielmehr könnten jedoch eine sich in hoher Frequenz wiederholende Nutzung der HoloLens zu muskulären Ermüdungserscheinungen führen. Ein ähnlicher Sachverhalt kann hinsichtlich der

repetitiven Interaktion mit der HoloLens festgestellt werden. Der Air-tap ist aufgrund einer kurzweiligen Bewegungsausführung beanspruchungsminimal, kann aber durch mehrere Wiederholungen möglicherweise ermüdend wirken.

Die im Zuge der zweiten Teilstudie vollführte realitätsnahe Versuchstätigkeit bedingt hingegen ein für sämtliche Muskelstellen erfasstes moderates Beanspruchungsniveau. Durch die dynamischen Arbeitstätigkeiten, wie dem Rüstvorgang einer Rotationszugbiegemaschine, erfolgt aufgrund der weitgehend natürlichen Bewegungen des Probanden eine ständige Kontraktion und Relaxation der Muskeln, die dadurch weniger beansprucht werden als bei einer rein statischen Muskelbelastung. Ermüdungserscheinungen sind erneut nur bei einer repetitiven Interaktion mit dem Unterstützungssystem ohne Einhaltung von Pausen denkbar.

Die muskuläre Aktivität ist im Zuge der Nutzung des Unterstützungssystems im Vergleich zur Rüstaufführung mithilfe der Papierinstruktion mit nur einer Ausnahme geringer – im Gegensatz zu den Ergebnissen der ersten Teilstudie. Der Tag-along-Modus verhilft dem Nutzer dazu, wichtige Informationen direkt am Ort des Geschehens einsehen und damit unnötige Kopfbewegungen vermeiden zu können. Das kleine Sichtfeld der HoloLens trägt ebenso zu reduzierten Auslenkungen des Kopfes bei. Die Ortsgebundenheit der Papierinstruktion führt dazu, dass der Proband einer Mehrbeanspruchung durch das Ergreifen der Instruktion ausgesetzt ist. Die Hologramme der HoloLens folgen, sofern sie nicht fixiert wurden, dagegen dem Sichtfeld des Nutzers, sodass eine räumliche Überlagerung der Instruktionen mit dem operativen Tätigkeitsfeld des Probanden resultiert. Die Folge sind verminderte Kopfbewegungen und Auslenkungen des Oberkörpers, die durch die verminderte Aktivierung des Trapezius- und des Sternocleidomastoideus-Muskels nachweisbar werden. Vergleichbare Erkenntnisse wurden auch durch LIM et al. (2022) gewonnen. Durch den Einsatz von Augmented-Reality-Brillen konnten im Zuge chirurgischer Eingriffe einerseits Fehl- oder Zwangshaltungen der Chirurgen, die klassischerweise durch das Einsehen von Video- bzw. Bildmaterialien entstehen können, reduziert und andererseits die Muskelermüdung, insbesondere des Trapez- und Sternocleidomastoideus-Muskels, verringert werden. In Bezug auf die HoloLens-Anwendung wird einzig der untere rechte Teil des M. trapezius pars descendens stärker beansprucht. Dieser Sachverhalt ist durch die Notwendigkeit der Interaktion mit der Datenbrille und die damit einhergehende kranial-ventrale Auslenkung des rechten Armes auf Gesichtshöhe begründet.

Im Vergleich der unterschiedlichen Fenstermodi der HoloLens zeigt sich, dass die muskuläre Beanspruchung bei der Nutzung der örtlich gebundenen Rüstanweisungen marginal höher ist als diejenige im Rahmen des variablen Fenstermodus. Im fixierten Fenstermodus wurde die Montageanleitung auf der Höhe der Papierinstruktion positioniert, d. h. linksseitig der Ausgangsposition

des Probanden und der Rotationszugbiegemaschine. Das Einsehen der Informationen erforderte eine entsprechende linksseitige Körperausrichtung, die sich in einer verstärkten Muskelaktivität der rechtsseitigen Muskelgruppen widerspiegelt. Die hinsichtlich der Interaktionsanforderungen identischen Bewegungsabläufe machen jedoch deutlich, dass zwar deskriptive Unterschiede festzustellen waren, diese jedoch keine statistische Signifikanz aufwiesen.

Die Muskelaktivität steigt außerdem mit fortschreitender Versuchsdauer an. Diese ist im zweiten Versuchsabschnitt jedoch nur im Vergleich der HoloLens-Anwendungen signifikant höher als im ersten Rüstabschnitt. Die deskriptiven Mittelwertsunterschiede der Rüstdurchgänge mit der papier-basierten Anleitung waren statistisch nicht signifikant. Daher deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die erhöhte Muskelaktivität im zweiten Versuchsabschnitt tendenziell dem Tragen der HoloLens und nicht einer natürlichen Ermüdung geschuldet ist.

Die Teilergebnisse zur muskulären Beanspruchung zeigen zum Teil eine Diskrepanz zwischen objektiven und subjektiven Daten auf. Der subjektiv empfundene muskuläre Mehraufwand bei Anwendung der HoloLens resultiert aus der vermeintlichen Schlussfolgerung der Probanden, dass mit den Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich ein höherer muskulärer Aufwand im Schulter-Nacken-Bereich einhergeht. Ähnliche Erkenntnisse hinsichtlich eines „unkomfortablen“ Tragekomforts des HMD und einer im Vergleich zu objektiven Daten entsprechend konträren und nicht deckungsgleichen Ergebnissen konnte auch durch HOOVER (2018) sowie RADKOWSKI & INGEBRAND (2017) nachgewiesen werden.

Die konstruktiven Gegebenheiten der HoloLens der ersten Generation bedingen, dass neben der muskulären Beanspruchung auch Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich festgestellt wurden. Die Auflagepunkte der Datenbrille, d. h. Stirn, Nase, Schläfe sowie Hinter- und Oberkopf, sind dabei auch aufgrund der dünnen Hautschicht besonders problematisch. Die Materialbeschaffenheit des Nasenpads (Silikon) und des Kopfgurtes (strapazierfähiger Kunststoff) bestehenden sowie die notwendige Verlagerung des Sitzes der HoloLens für Brillenträger verstärken eine entstehende Druckspannung, die durch das Tragen der Brille per se entsteht. Die technischen Komponenten der HoloLens sind im vorderen bzw. gesichtsseitigen Teil der Brille verbaut, sodass eine überwiegend einseitige Schwerpunktlast entsteht. Die Datenbrillen-Nutzung bedingt weiterhin eine Wärmeentwicklung des Batteriespeichers, dessen Abwärme in Teilen auch an den Nutzer abgegeben wird. In Kombination mit dem Gewicht des HMD konnten dementsprechend Druck- bzw. Wärmestellen im Kopfbereich insbesondere am Stirn- und Nasenansatz sowohl objektiv (34 °C bis maximal 36 °C) als auch subjektiv (moderate bis starke Beanspruchung) festgestellt werden. Der durch das Tragen der HoloLens hervorgerufene signifikante Temperaturanstieg beträgt für sämtliche Kopfstellen ca. 1 °C. Die Superposition der beschriebenen Aspekte führt zu einer an den

Auflagestellen erfolgenden Drosselung der Blutzufuhr, die wiederum Durchblutungsstörungen und letztlich Schmerzen seitens des Nutzers hervorrufen können.

Insgesamt ist anzumerken, dass sowohl die objektiven als auch die subjektiven Beanspruchungsdaten im Zuge des Rüstvorgangs ein moderates Maß nicht überschreiten. Die Anwendung der AR-Technologie führt, wie auch von THEIS et al. (2016) herausgestellt wurde, hinsichtlich der Schulter-Nacken-Muskulatur nicht zu einer übermäßig starken Mehrbeanspruchung des Nutzers. Die Unterschiede der OEMG-Daten mit und ohne Nutzung der HoloLens sind minimal. Die Hypothesen **H3** und **H4**, **die eine Veränderung der objektiven (H3) und subjektiv empfundenen Muskelbeanspruchung im Schulter-Nacken-Bereich (H4) voraussagen**, können somit zwar bestätigt werden. Die Interpretierbarkeit der objektiven muskelphysiologischen Ergebnisse ist bei einem gleichzeitig vorherrschenden sehr geringen Beanspruchungsgrad damit jedoch nur begrenzt möglich. Die Wärmeentwicklung im Kopfbereich nimmt hingegen signifikant zu und stellt ein potenzielles Risiko für das thermische Wohlbefinden des Nutzers dar, das durch die subjektive Einschätzung der Probanden auch attestiert wurde. Somit sind die Forschungshypothesen **H5 (Erfassung einer objektiven Komfortbeeinträchtigung im Kopfbereich)** und **H6 (Nachweis einer individuell erlebten Komfortbeeinträchtigung im Kopfbereich)** ebenfalls zu verifizieren.

9.2.3 *Subjektives und kognitives Beanspruchungserleben*

Insgesamt ist ein Unterschied der Arbeitsbelastung zwischen der Versuchsdurchführung mit und ohne HoloLens im Zuge beider Teilstudien erkennbar. Die Erkenntnisse zu den beschriebenen messtechnisch und über Bewertungsverfahren erfassten körperlichen Anforderungen decken sich mit den subjektiven Ergebnissen hinsichtlich einer durch die Datenbrillen-Nutzung hervorgerufenen Beanspruchung.

Wie insbesondere durch die Analyse des NASA-TLX- und des VFQ-Fragebogens ersichtlich wurde, übte das Tragen der HoloLens sowohl in der ersten als auch in der zweiten Teilstudie einen statistisch signifikanten Einfluss auf die visuelle Ermüdung aus. Hypothese **H9** ging von einem **Unterschied hinsichtlich der visuellen Ermüdung zwischen der Nutzung und Nicht-Nutzung der HoloLens** aus, der demnach bestätigt werden konnte. Im Vergleich zur Anwendung ohne Datenbrille steigerte sich die subjektive Beanspruchung im ersten Versuchsverlauf um bis zu 54 %. Die Probanden gaben an, durch vielzählige Blickwechsel, das (zu) kleine Sichtfeld der HoloLens und die Kombination von realen und virtuellen Elementen insbesondere Kopfschmerzen und Nackenschmerzen sowie geistige Ermüdungserscheinungen zu verspüren: „[...] *Man muss sich immer wieder ein wenig umgewöhnen. Schaut man jetzt auf das Hologramm oder die Maschine? Das*

ist gewöhnungsbedürftig und schon etwas anstrengend“ (VP07, Teilstudie 2). Werden notwendige Auslenkungen des Kopfes und Bewegungen der Augen nicht ausgeführt, sind die holografischen Instruktionen nicht vollumfänglich einsehbar, sodass die beschriebenen Beschwerden entstehen können. Die geistige Ermüdung lässt sich nicht ausschließlich auf den Umgang mit der HoloLens zurückführen. Die lange Versuchszeit von vier bis sechs Stunden trug genauso zur Erschöpfung bei, wie die (zunächst) unbekannte Versuchsaufgabe. Die Versuchspersonen klagten zu Beginn über „schwere Augen“ und hatten Schwierigkeiten, die Informationen scharf zu sehen. Dementsprechend beeinflusste die visuelle Belastung auch den kognitiven Aufwand der Probanden. Pausen und die wiederholte Nutzung des Systems führten jedoch dazu, dass dieser Effekt im Laufe des Versuchs abgeschwächt wahrgenommen wurde. Insgesamt spiegeln sich die beschriebenen Erkenntnisse in einer zufriedenstellenden und nur geringfügig frustrierenden Versuchstätigkeit wider, die zudem ohne ausgeprägten zeitlichen Druck ausgeführt wurde.

Die Auswertung des RSME und des NASA-TLX ergab, dass, wie von Hypothese **H7** postuliert, **die kognitive Beanspruchung durch die Nutzung der HoloLens im Vergleich zur Anwendung ohne HMD sowohl bei einfachen Montagetätigkeiten und statischen Blickpositionierungen als auch im Zuge eines industriellen Rüstvorgangs stets höher war.** Damit wird diese Hypothese verifiziert. Insbesondere im Hinblick auf die zweite Teilstudie zeigt sich, dass die Probanden eine erhöhte mentale Beanspruchung erfahren, wenn die Inhalte der Arbeitsanleitung nicht ihrem prozessrelevanten Erfahrungs- bzw. Wissensstand entsprechen. Insbesondere zu Versuchsbeginn ist die mentale Beanspruchung hoch, v. a. durch die Neuartigkeit der Aufgabe im Hinblick auf den Rüstprozess und die Interaktionsanforderungen der Datenbrille sowie die Vielzahl relevanter Informationen. Somit sind eine größere Konzentration und Aufmerksamkeit seitens der Probanden erforderlich. Dieser Effekt ist durch die erhöhte Komplexität der Versuchsaufgabe im Rahmen der zweiten Teilstudie im Vergleich zu Teilstudie 1 stärker ausgeprägt. DROUOT et al. (2022), die Auswirkungen von Augmented Reality bzw. der Nutzung der HoloLens 2 auf die Effektivität und psychische Arbeitsbelastung im Zuge industrieller Fließbandarbeit untersuchten, zeigten jedoch beispielhaft, dass die AR-Anwendung auch bei einfachen Montagearbeitsplätzen eine höhere mentale Arbeitsbelastung generieren kann. Zum einen führt die Vielzahl neuartiger und interaktiver Versuchskomponenten wie der Untersuchungsgegenstand und die Aufgabe dazu, dass die Probanden eine erhöhte intrinsische kognitive Belastung verspüren. Zum anderen stellt das Lernmaterial eine fremdbestimmte Belastung dar (vgl. DE JONG, 2010). Die Vielzahl der im AR-basierten Ansatz verfügbaren Materialien kann die Nutzer überfordern (vgl. FUNK et al., 2016). Schließlich bietet das System den Nutzern verschiedene Interaktions-Möglichkeiten, wie z. B. das Ansehen eines Videos, das Lesen von Textanweisungen und das Beobachten eines Vorgangs durch ein

überlagerndes 3D-Hologramm. Dies kann von ihnen mehr Aufmerksamkeit und kognitive Verarbeitung verlangen als bei einfacheren und papierbasierten Anweisungen. Weiterhin können technologische bzw. sensorische Einschränkungen des Systems, wie bspw. die nicht exakte Überlagerung der Werkzeug-Hologramme mit den realen Elementen, in Bezug auf die Genauigkeit zu einer Verzerrung der Ergebnisse beitragen. In Kombinationen blockieren die Belastungsarten die individuellen kognitiven Ressourcen des Nutzers. Möglicherweise werden zusätzlich Teile der Instruktion, wie z. B. die holografische Darstellung der Montagerichtung eines Werkzeugs und die dazugehörige Videosequenz, als redundant wahrgenommen. Fraglich ist, inwieweit eine alternative Darstellungsart, wie bspw. eine diagrammbezogene Visualisierung (vgl. DE JONG & FERGUSON-HESSLER, 1996), tatsächlich zu reduzierten Belastungswerten geführt hätte. Außerdem beeinflusst die wiederholte Darstellung von Informationen die kognitive Belastung. Eine mehrfache Repetition der Anwendung führt zu einer Automatisierung der jeweiligen Handlung und des Wissens, das einen Lernprozess anstößt („[...] Das Zusammenbauen geht [...] dann schnell in einen Automatismus über. Man lernt schnell“, VP20, Teilstudie 2). Durch eine standardisierte Schemabildung wird das Kurzzeitgedächtnis entlastet und die kognitive Beanspruchung mit steigender Wiederholungszahl der Rüstdurchführungen reduziert (vgl. SWELLER et al., 1998).

Der Tag-along-Modus der HoloLens trägt zwar zu einer hohen Reiz-Reiz-Kompatibilität bei, kann durch die ständige Überlagerung der Informationen allerdings auch als störend bzw. belastend empfunden werden:

„Dadurch, dass die Informationen ständig direkt vor der Nase waren, musste ich mich ständig neu orientieren [...]“ (VP10, Teilstudie 2).

Die Fülle an multimedialen Inhalten der HoloLens führt im Vergleich zu den „starrten“ Instruktionen der papierbasierten Anleitung wiederum dazu, dass das Kurzzeitgedächtnis der Versuchspersonen bzw. die kapazitiven Beschränkungen gemäß der kognitiven Belastungstheorie in Form eines „Information Overload“ durch die Vielzahl an Informationen und den damit einhergehenden erhöhten Zeitaufwand überlastet werden kann (vgl. MILLER, 1956). *Versuchsperson Nr. 14* bestätigte im Rahmen der Teilstudie 2 diesen Zusammenhang:

„Bei mir ist sie (kognitive Belastung, Anm.) mit der HoloLens auch intensiver gewesen, weil ich einfach mehr Informationen bekomme“.

Das Versuchssetting der ersten Teilstudie zeigt jedoch, dass dieser Sachverhalt nicht ausschließlich auf die unterschiedlichen Montageanweisungen zurückzuführen ist. Die hier verwendeten Instruktionen wiesen einen identischen Informationsgehalt auf. Dennoch wurde eine erhöhte kognitive Beanspruchung im Umgang mit der HoloLens verzeichnet.

Während die kognitive Beanspruchung bei einfachen Tätigkeiten, wie statische Blickpositionierungen und die Montage eines LEGO-Fliegers, mit fortschreitender Versuchsdauer weitgehend konstant bleibt, nimmt sie im Zuge des Rüstvorgangs einer Rotationszugbiegemaschine ab. Zwar können in Bezug auf Letzteres direkte und signifikante Vergleiche der Durchführungsarten her- und festgestellt werden, allerdings ist durch die mehrfache Wiederholung des Rüstvorgangs eine eindeutige Vergleichbarkeit der Versuchsabschnitte nicht gegeben. Diesen Umstand bekräftigt *Proband Nr. 5* im Zuge der *zweiten Teilstudie*:

„[...] Und dadurch, dass man beides (Papier- und AR-Instruktion, Anm.) immer besser kennt, wird natürlich die mentale Belastung umso niedriger, je öfter man es gemacht hat“.

Eine zwischen den Versuchsabschnitten festzustellende starke kognitive Belastungsreduktion und ein damit einhergehender Verlust der Aufmerksamkeit, der u. a. auf den Wechsel der Belastungsarten zurückzuführen ist, führte bei einzelnen Probanden dazu, dass im zweiten Versuchsabschnitt mehr Fehler begangen wurde. Dies wurde durch einen betroffenen Probanden (*VP03, Teilstudie 2*) sogar selbst ausführlich bestätigt:

„[...] Man wusste, wie es läuft und worauf man zu achten hat. Als man dann nicht mehr die HoloLens hatte, sind [...] Flüchtigkeitsfehler passiert [...]. Ich habe gemerkt, die Aufmerksamkeit ist [...] schwieriger ohne Brille zu halten, vor allem im zweiten Durchgang ohne Brille. Und als ich die Brille wieder hatte, hatte ich das Gefühl, dass ich durch das Klicken usw. wieder viel aufmerksamer bin“.

Zusammenfassend kann Arbeitshypothese **H8, die mit fortschreitender Tätigkeitsdauer bzw. repetitiver Nutzung einer neuartigen AR-basierten Datenbrille eine Abnahme kognitiver Beanspruchungsparameter voraussagt**, also nicht eindeutig verifiziert oder falsifiziert werden.

In diesem Zusammenhang ist für die zweite Teilstudie außerdem die Diskussion des sogenannten „Expert-Reversal Effect“ (ERE) von Interesse (vgl. KALYUGA, 2007, 2003). Experten verfügen im Regelfall, basierend auf ihrem Erfahrungswissen, über umfassende Schemata zur Durchführung von unterschiedlichen Tätigkeiten. Wenn sie eine Anleitung verwenden, die nicht ihrem prozessrelevanten und kontextspezifischen Wissen entspricht, kann die Aufnahme redundanter Informationen zu einer höheren kognitiven Belastung führen. Die Probanden waren zu Beginn des Versuchs durch die in den Instruktionen enthaltene und durch die Anwendung eines neuartigen AR-Systems begründete Vielzahl an Daten und Informationen zwar kognitiv belastet, konnten sich

durch die Anleitung jedoch prozessspezifisches Wissen und Erfahrung aneignen. Zwar wiesen einige Probanden geringfügige Rüstervahrungen auf, allerdings konnte keiner der untersuchten Versuchspersonen als tatsächlicher Experte für den Rüstvorgang von Rotationszugbiegemaschinen ausgewiesen werden. Dieser Aspekt, gepaart mit den beschriebenen Erkenntnissen, dass die Wiederholungen der Informationen und die dadurch entstehenden Schemata zu einer Reduzierung der kognitiven Belastung im zweiten Versuchsdurchgang geführt haben, lässt schlussfolgern, dass ein ERE tendenziell auszuschließen ist.

Zusammengefasst erfahren die Probanden durch mehrfache Wiederholung der Aufgaben, d. h. des Rüstvorgangs sowie der Interaktion mit den jeweiligen Instruktionen, eine verminderte kognitive Belastung und produzieren zudem weniger Fehler. Mit der Anwendung unterschiedlicher Unterstützungsformen geht zudem einen Wechsel der Belastungsarten einher, der eine Belastungsminderung bzw. eine Bewahrung der kognitiven Leistungsfähigkeit begünstigt. Die im Vergleich zu einer papierbasierten Instruktion visualisierten holografischen Inhalte ermöglichen den Probanden eine vermeintlich effizientere Durchführung des Prozesses. Weiterhin beugt die AR-Unterstützung tendenziell einsetzenden Konzentrationsnachlässigkeiten vor. Zwar konnte eine durch die Nutzung des Unterstützungssystems, wie bspw. von TANG et al. (2003) beschrieben, unmittelbar starke Abnahme der kognitiven Belastung nicht nachgewiesen werden. Allerdings nimmt diese im Laufe der Versuchsdurchführung kontinuierlich und vereinzelt deutlich ab. Außerdem bleibt eine erfolgreiche Durchführung des Rüstprozesses davon unberührt. Wie ebenfalls von JEFFRI & RAMBLI (2021) festgestellt werden konnte, beeinflusst die Anwendung von AR-Systemen die mentale Arbeitsbelastung und Aufgabenleistung in Bezug auf einen realen Anwendungskontext zweifelsohne positiv. Die inhärente Eigenschaft von AR, relevante virtuelle Informationen in Echtzeit in die „reale Welt“ zu implementieren führt dazu, dass die kognitive Beanspruchung reduziert wird und mentale Ressourcen für Such-, Visualisierungs-, Erinnerungs-, Beschaffungs- sowie Verständnis- oder Verarbeitungsaufgaben freigesetzt werden. Somit können sich die Nutzer intensiver bzw. konzentrierter mit der eigentlichen Arbeitsaufgabe auseinandersetzen (RE et al., 2016). Offen bleibt jedoch zum derzeitigen Stand, ob sich bei den Nutzern ein langfristiger Gewöhnungseffekt und eine nachhaltige Akzeptanz einstellen wird.

9.3 Auswirkungen des Unterstützungssystems auf die Leistung der Maschineneinrichter

Die Nutzung AR-basierter CPPS garantiert per se keine Leistungssteigerung, Diese Erkenntnis wird auch u. a. durch die Studien von WERRLICH et al. (2019) und KOSSLYN (2006) bestätigt. Trotz vielversprechender Ergebnisse zahlreicher und unterschiedlicher Studien im Hinblick auf eine

Fehlerreduktion (vgl. u. a. HOOVER, 2018; RADKOWSKI & INGEBRAND, 2017) wird diesbezüglich auf die Grenzen von AR hingewiesen. In Bezug auf die Genauigkeit weist KOSSLYN (2006) bspw. darauf hin, dass es kein unbestreitbares Ergebnis über die Auswirkungen der AR-basierten Visualisierung auf die genaue Positionierung der visualisierten Elemente gibt. WERRLICH et al. (2019) behaupten in ihren Ausführungen, dass Montagearbeiter Aufgaben mithilfe von Papieranweisungen zwar schneller ausführen, allerdings ist die Anzahl der begangenen Fehler bei der Verwendung einer AR-Unterstützung geringer als bei der Verwendung von papierbasierten Anweisungen. FUNK et al. (2016) und BÜTTNER et al. (2020) präsentierten jedoch gegenteilige Ergebnisse, die außerdem mit einer signifikant höheren kognitiven Belastung einhergehen. Diese Erkenntnisse werden auf die zu dem Zeitpunkt der Studiendurchführung noch fehlende technische Hardware-Ausstattung zurückgeführt.

Die erhobenen quantitativen Daten der vorliegenden Forschungsarbeit setzen daran an und deuten darauf hin, dass AR-basierte Anweisungen durchaus zur **Minimierung der Fehlerrate (H11)**, zur Steigerung der Effizienz und letztlich zur Prozesssicherheit sowie zur Generierung eines etwaigen Lerneffekt verantwortlich sein bzw. dazu beitragen können. Bezogen auf die zweite Teilstudie kann Hypothese **H11** also bestätigt werden. Die qualitativen Ergebnisse zeigen in jedem Fall, dass den Maschineneinrichtern die Durchführung eines effizienten Rüstprozesses ermöglicht werden kann. Theoretisch kann ein signifikanter Lerneffekt erzielt werden, wenn Prozesse und Verfahren in mehrfacher Ausführung wiederholt werden (vgl. SCHATZKI et al., 2005; SCHATZKI, 2001). DROUOT et al. (2022) deuten außerdem darauf hin, dass die gegenseitige Abhängigkeit von Montageschritten ein Indiz für ein geringes Fehlerniveau sein kann. Die beschriebene Einschätzung konnte durch das Versuchsdesign der ersten Teilstudie allerdings noch nicht in Gänze gewonnen werden. Durch das kleine Sichtfeld und aufgrund der geringen Kontraste der verwendeten Montageanweisung hatten die Probanden Schwierigkeiten, die Anweisungen im Vergleich zur Anwendung ohne HoloLens schnell und vollumfänglich zu erkennen sowie die dazugehörige Aufgabe entsprechend produktiver umzusetzen. Die Vorteile des Einsatzes der HoloLens, d. h. dessen gestenbasierte Steuerung im Rahmen einer prozessbegleitenden Anwendung und die Nutzung technologischer Neuheiten, wie z. B. animierte Hologramme sowie multimediale Inhalte (*„Die Papier-Anleitung ist zwar gut, verhilft jedoch nicht so schnell zum Verständnis des Rüstprozesses wie die Videos der HoloLens“*, VP10, Teilstudie 2), traten erst in der zweiten Teilstudie in Erscheinung. Die Neuartigkeit der Aufgabe und eine damit einhergehende Reizüberflutung und Informationsüberlastung bedingt zunächst eine erhöhte Fehlerzahl zu Beginn des Versuchs:

„Man ist mit der HoloLens besser, wenn man sich erst einmal daran gewöhnt hat. Am Anfang muss man sich nämlich erst einmal auf dieses neue, technische Hilfsmittel konzentrieren“ (VP24, Teilstudie 2).

Begründen lässt sich die Annahme damit, dass der Fokus der Probanden während des Erlernens des Umgangs mit der HoloLens und dem Ausführen des Versuchs auf der reinen Ausführung der Tätigkeit und weniger auf einer möglichst hohen Prozesseffizienz in Form einer fehlerminimalen und schnellen Durchführung ausgerichtet ist. Diesen Umstand belegt im Zuge der zweiten Teilstudie sowohl VP04 (*„Zu Beginn [...] musste ich mich mehr auf die HoloLens konzentrieren als auf den eigentlichen Rüstvorgang“*) als auch VP 11 (*„Erst konzentriert man sich total auf die Brille. Aber dann macht es irgendwann ‚Klick‘ und man hat eine recht steile Lernkurve [...]. Von Mal zu Mal wird es dann einfacher“*). Aufgrund der einfachen Bedienung sowie der intensiven und konzentrierten Auseinandersetzung mit dem Unterstützungssystem setzte ein Lerneffekt sowohl hinsichtlich des Rüstprozesses als auch in Bezug auf den Umgang mit der Datenbrille und der Applikation schnell ein. Anhand einer Fehlerreduktion von bis zu ca. 92 % wurde ersichtlich, dass sich die wiederholte Nutzung der AR-Technologie hinsichtlich der Fehlerzahl begünstigend auf den Rüstprozess auswirken kann. Es ist anzunehmen, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt der Versuchsausführung die Wiederholungen der Informationen zu einer niedrigeren kognitiven Belastung und einer Fehlerreduktion führen. VAN MERRIËNBOER & SWELLER (2005) stellen dar, dass mehrere Wiederholungen nötig sind, um prozedurales Wissen als Schemata abzubilden. Im Zuge des zweiten Versuchsabschnitts erfahren die Probanden also eine kognitive Entlastung zugunsten der Aneignung prozeduralen Wissens. Dieser wissensintensive Lernprozess bildet die Grundlage für Entscheidungen, d. h. im vorliegenden Fall hinsichtlich der Durchführung der einzelnen Rüstschritte. Dieser Sachverhalt begründet demnach die Reduzierung der Fehlerzahl im zweiten Versuchsdurchgang.

Vereinzelt stieg die Fehlerzahl gegen Ende der Versuchsdurchführung jedoch an – insbesondere bei Verwendung der Papierinstruktion. Zwar gaben die Probanden an, dass sich die kognitive Belastung im Zuge der Versuchsdurchführung verringert. Allerdings verspürten die Probanden in Folge der insgesamt über mehrere Stunden andauernden Aufgabe Ermüdungserscheinungen:

„Am Ende war es [...] von der Länge der Versuche so, dass es anstrengend wird“ (VP21, Teilstudie 2).

REINHART & ZÄH (2014) belegen diese Erkenntnis zulasten einer verminderten Effektivität bzw. einer erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeit innerhalb der Arbeitsaufgabe. Die daraus resultie-

renden Aufmerksamkeitsdefizite schränken außerdem einen Lernprozess ein. Die Anleitungsformen wiesen mit Ausnahme des Videos und der holografischen Animationen dieselben Grundinformationen auf. Neben dem technologischen Informationsvorteil der HoloLens ist ein weiterer Aspekt in der Positionierung der Anleitung zu finden. Die örtliche Bindung verleitet die Versuchspersonen dazu, den Instruktionen mit fortschreitender Zeit nicht aufmerksam zu folgen (*„Ich habe die Papieranleitung auf dem Tisch liegen und gucke da aber nicht mehr wirklich drauf, weil ich weiß, wie es läuft. Das heißt ich lasse die außer Acht. Und mit der HoloLens kann ich das im Prinzip gar nicht.“*, VP03, Teilstudie 2). Die AR-basierten Informationen waren für die Probanden unmittelbar (via des Tag-along-Modus) oder zumindest leicht einsehbar, d. h. eine erforderliche leichte Kopfbewegung, um die Informationen im fixierten Fenstermodus von der Maschine aus einsehen zu können. Für die Betrachtung der papierbasierten Anweisung musste die Entfernung von Maschine zur Instruktion zurückgelegt werden. Daher verzichteten die Probanden auf eine erneute „Rückversicherung“, sodass eine größere Fehlerwahrscheinlichkeit resultierte:

„Wenn die Anleitung direkt vor mir liegt, okay. Aber wenn sie woanders ist und ich sie erst suchen muss, das bringt mir nichts“ (VP23, Teilstudie 2).

Weiterhin differierten die Ausführungszeiten im Vergleich der Durchführung mit und ohne HoloLens. Die Probanden benötigen mit der AR-basierten Anleitung für einen Rüstprozess im Gesamtdurchschnitt rund 22 % mehr Zeit als mit der Papierinstruktion, sodass Hypothese **H10, die eine Reduktion der zeitlichen Dauer einer Arbeitstätigkeit prognostizierte**, nicht bestätigt werden konnte. Während DROUOT et al. (2022) ähnliche Erkenntnisse präsentierten, stellten SPEIER et al. (2003) in diesem Zusammenhang jedoch konträre Ergebnisse vor, die auf Vorteile der räumlichen Repräsentation hinweisen. Wie beschrieben, zeigte die Analyse des RSME weiterhin, dass das Tragen der Datenbrille eine höhere kognitive Beanspruchung verursacht. Nach TANG et al. (2003) ermöglicht AR hingegen eine Reduktion des mentalen Aufwands, da die Aufmerksamkeit nicht kontinuierlich zwischen der Arbeitsumgebung und der eigentlichen Aufgabe variiert. Somit kann eine höhere Arbeitsleistung erreicht werden. Diese scheinbar gegensätzlichen Ergebnisse können jedoch durch unterschiedlich komplexe Aufgaben verursacht werden. Die Studienergebnisse zeigen, dass die AR-Instruktionen zwar im Laufe der Versuchsdurchführung, nicht jedoch zu Beginn der Tätigkeit, zu einer Leistungssteigerung führen. Vielmehr verursacht die multimodale Visualisierung des HMD eine hohe kognitive Beanspruchung (vgl. CHEN et al., 2009; FEINBERG & MURPHY, 2000). Diese Erkenntnisse können auf eine mangelnde Genauigkeit der Hologramme zurückgeführt werden (*„Für den Zweck (Rüstvorgang, Anm.) war die Darstellung ausreichend. [...] Für die Zukunft bzw. für noch umfangreichere und komplexere Vorgänge sollte*

eventuell eine höhere Auflösung, also schärfere Darstellungen, angestrebt werden“, VP01, Teilstudie 2). BRESCIANI & EPPLER (2009) weisen darauf hin, dass in einem solchen Fall der Effekt einer übermäßigen fremdbestimmten kognitiven Belastung auftritt.

Auf Grundlage der kontinuierlichen Reduktion der Rüstzeit kann ein Lernerfolg abgeleitet werden. Ein inferenzstatistischer Nachweis belegt, dass die Rüstvorgänge einerseits ohne Einsatz der HoloLens schneller erfolgten und andererseits die Probanden mit den Wiederholungen des Einrichtungprozesses schneller wurden. Ein Erklärungsansatz findet sich in der Annahme, dass die Probanden insbesondere Bestandteile der Papier-Anleitung zwar wahrgenommen, diese aber nicht vollumfänglich konsumieren bzw. analysieren mussten, da sich im Laufe des Prozesses auch mithilfe der HoloLens-Anweisungen eine wissensbasierte, automatisierte Durchführung der Arbeitsaufgabe eingestellt hatte. Die konstante Verkürzung der Ausführungszeiten deutet darauf hin, dass die Probanden einen kontinuierlichen Lernprozess durchlaufen. Ergebnisse aus früheren Studien zeigen, dass die Lernkurve nach der ersten Trainingsphase gleichmäßig abflacht (vgl. WILSCHUT et al., 2019). Auch BÜTTNER et al. (2020) zeigen in einer Studie zur Trainingsanalyse, dass persönliches Training, Training auf der Basis einer In-situ-Projektion und Training auf der Basis einer Papieranleitung kurzfristig gleich gut abschneiden. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Probanden, die den Versuch mit der HoloLens starteten, aufgrund der erforderlichen Aufmerksamkeit im Umgang mit dem System, der Aufgabe und der vermeintlich im Vergleich zur Anwendung Papier-Instruktion optimierten Informationsdarstellungen von Beginn an einen stärkeren Lerneffekt respektive eine steilere Lernkurve erfahren. Dieser macht sich bei anfänglicher Verwendung der Datenbrille im Vergleich zur Durchführung ohne HoloLens durch ein geringeres Fehlerniveau bemerkbar. Diese Erkenntnis wurde z. B. durch *Proband Nr. 24* innerhalb der *Teilstudie 2* ausführlich bestätigt:

„Also man wird direkt ein bisschen ins kalte Wasser geschmissen. Man ist quasi gezwungen, sich von der ersten Sekunde auf die Brille und die Aufgabe einzulassen. Dadurch, dass man damit ziemlich genau angeleitet wird, ist es auf jeden Fall besser, selbst wenn man keine Vorerfahrungen auf dem Gebiet hat, direkt damit (mit der HoloLens, Anm.) einzusteigen. Dann ist man direkt sicherer“.

Die probandenspezifischen Schemata sind neben den beschriebenen Aspekten auch von Erfahrungswerten abhängig. Die Hälfte der Probanden wiesen Rüsterfahrung an unterschiedlichen Maschinen auf, allerdings rüstete keiner der Versuchspersonen jemals zuvor die im Versuch herangezogene Rotationszugbiegemaschine. Weiterhin können Erfahrungswerte hinsichtlich der Nutzung digitaler Endgeräte die kognitive Belastung und letztlich die Fehleranzahl beeinflussen.

Wenngleich eine inferenzstatistische Signifikanz nicht nachgewiesen werden konnte, bekräftigten die Probanden diesen Zusammenhang:

„Vieles (bzgl. der Interaktion, Anm.) ist man aus dem Alltag gewohnt, wenn man Computer, Tablets etc. nutzt“ (VP20, Teilstudie 2).

Der Umgang mit der HoloLens fällt den Arbeitspersonen somit deutlich leichter, wodurch sich die Fokussierung auf das Ziel verschiebt, d. h. den erfolgreichen Rüstprozess. Ein Lerneffekt und eine Reduzierung der mentalen Belastung können demnach schneller eintreten. Inwieweit die Affinität zu digitalen Endgeräten mit einer reduzierten Fehlerzahl auch bei älteren Probanden korreliert, die überwiegend geringere Erfahrungswerte im Umgang mit IT-Geräten aufweisen, ist unklar und bedarf weiterer Forschungsarbeit (vgl. WANG et al., 2013). Vergleichbare Erkenntnisse konnten für den Zusammenhang der Technikaffinität und der Leistung der Probanden in Bezug auf die zweite Teilstudie gewonnen werden. Die deskriptiven Unterschiede deuten jedoch darauf hin, dass einige Probanden durch ihre Affinität zu unterschiedlichen technischen Situationen weniger Montagefehler produzierten. Die Probanden greifen im Zuge des Rüstprozesses auf situatives und in Schemata abgelegtes Wissen zurück. Auch die Probanden bestätigen, dass *„ein gewisses technisches Verständnis Grundvoraussetzung sein müsste“* (VP14, Teilstudie 2).

Zweifelsohne weisen AR-Anweisungen einen deutlichen Mehrwert auf, wenn sie mit sensorischen Werten kombiniert werden. Die Studienergebnisse zeigen, dass AR-Anweisungen in Kombination mit sensorischen Prozesswerten hinsichtlich der Arbeitsorganisation zu einer Optimierung und Standardisierung von Rüstvorgängen führen können. Dies führt wiederum zwangsläufig zu einer langfristig verbesserten Rüstleistung. Eine sensorische Kontrolle des Rüstvorgangs, bspw. mit kamerabasierten Systemen, begünstigt außerdem eine kognitive Entlastung der Maschineneinrichter, indem die Angst vor einer fehlerhaften Ausführung des visualisierten Rüstschritts reduziert wird. Unerfahrene Maschinenbediener profitieren i. d. R. ausnahmslos von den beschriebenen Hilfsmitteln, da sie vornehmlich keine heuristischen Methoden zur Bewältigung einer bestimmten Situation oder Aufgabe anwenden können. Inwieweit jedoch erfahrene Arbeitspersonen tatsächlich durch AR-basierte Systematiken im Zuge ihrer Tätigkeiten unterstützt werden, ist fraglich. Aus derartigen Situationen kann, wie zuvor angedeutet, ein Umkehreffekt bzw. der „Expertise Reversal Effect“ resultieren.

Nicht zuletzt bestehen Fragen der Technologieabhängigkeit, die ebenfalls weiter untersucht werden sollten. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass Novizen stärker von der Nutzung einer AR-Technologie abhängig sind als Experten, wenn sie den Rüstprozess nicht selbstständig beherrschen (vgl. SHU et al., 2011). Daher sind Novizen im Vergleich zu erfahrenen Mitarbeitern

in der Entwicklung von autonomen Prozessabläufen stärker behindert und entsprechend abhängiger von der gewählten Technologie. Andererseits profitieren Novizen von den mit dem System eingeführten Standards, indem sie häufig gelernte Schemata aktivieren. Dieser Sachverhalt wirft die Frage auf, inwieweit die AR-Technologie das Lernen und die Professionalisierung der Arbeitstätigkeiten tatsächlich unterstützen kann.

Zusammenfassend kann argumentiert werden, dass es Raum für weitere Forschungen zu diesem Thema besteht – insbesondere unter realen und natürlichen Bedingungen, in denen die Arbeitnehmer keinen kontrollierten Umgebungen ausgesetzt sind (vgl. DEY et al., 2018). In Bezug auf CPPS ist die AR-Technologie nur ein Teil eines umfassenderen Konstrukts, das Sensortechnologie integriert und über „reine“ Anweisungen hinausgeht, um die Logistik von Fertigungsprozessen und die Qualitätskontrolle der daraus resultierenden Produkte zu berücksichtigen. Produktionsumgebungen beinhalten Anforderungen für produktive, komplexe Aufgaben und Werkzeuge sowie einen großen Anteil an mitarbeiterspezifischem Wissen, das in praktischen Handlungen eingebettet bzw. verkörpert ist. Zwar wurden im Zuge dieser Ausarbeitung einige Forschungsfragen beantwortet, allerdings besteht nach wie vor Forschungsbedarf hinsichtlich einer vollumfassenden Unterstützung AR- und wissensbasierter CPPS.

9.4 Limitationen der Untersuchungen

In der Literatur konnten bereits eine Reihe von Einschränkungen eruiert werden, die hauptsächlich die *Skalierbarkeit, Robustheit und Leistung von Cyber-Physischen Systemen* und die *Grenzen von Augmented Reality* betreffen (vgl. LIU et al., 2017; LEE, 2008). Da die vorgestellte Lösung einen Prototyp darstellt, müssen solche Fragen zukünftig noch geklärt werden. Insbesondere Ungenauigkeiten hinsichtlich der sensorischen Erfassung der Umgebung und daraus resultierende Abweichungen bei der Darstellung der Rüstanweisungen weisen auf diese Problematik hin. Gerade vor dem Hintergrund der Abnahme von Arbeitsanweisungen ist eine sensorische Erfassung der korrekten Durchführung von Rüstvorgängen hilfreich, da andernfalls Prozessfehler auf unzureichend genaue Anweisungen zurückgeführt werden. In der Folge leidet die Akzeptanz der Anweisungen enorm. Allerdings sind diese Barrieren aufgrund der fortschreitenden Technisierung von AR-basierten System zukünftig nicht erfolgskritisch. Rüstvorgänge, die durch einen enormen Anteil an verkörpertem Wissen charakterisiert sind, sind auch hinsichtlich des Datenschutzes zu betrachten. Die sensorische Erfassung von Rüstvorgängen mithilfe der HoloLens und der 3D-Kamera sowie die Möglichkeiten zur Auswertung von Rüstdaten anhand des Rüst-Editors machen deutlich, dass Rüstdaten transparent sind und Rückschlüsse auf die Leistung des Maschineneinrichters zulassen. Ein wesentlicher Bestandteil der Technologie ist die Erstellung von Daten und

die Visualisierung sowie anschließende Optimierung der zugrunde liegenden Prozesse. Da der Rüstvorgang personenabhängige Tätigkeiten beinhaltet, kann es zu Sensibilitäten kommen, die in Zukunft durch weitere Untersuchungen bewertet werden müssen.

Im Hinblick auf den Einsatz der beschriebenen *ergonomischen Bewertungsverfahren* ist u. a. festzuhalten, dass sowohl in den Leitmerkmalmethoden als auch im EAWS Angaben zur Repetition im Wesentlichen für eine Risikobeurteilung kurzzyklischer Tätigkeiten bei hohen Handhabungsfrequenzen (vgl. DIN EN 1005-5, 2007) ausgelegt sind, wie z. B. einer klassischen Fließbandarbeit. Durch die unterschiedlichen Einzeltätigkeiten fällt eine Analyse entsprechend vielseitig und komplex aus. Außerdem werden störende Einflussparameter, wie bspw. unzureichende Arbeitsstrukturen oder Arbeitsumgebungsbedingungen, einzig durch ein zwar subjektiv bewertetes, aber objektiv orientiertes Schema und nicht durch ein subjektives Empfinden evaluiert. Unabhängig von diesen Einschränkungen ist eine Risikoeinschätzung anhand der beschriebenen Verfahren sinnvoll. Zur spezifischen und wissenschaftlich fundierten Einordnung und Beurteilung physischer Belastungen und Beanspruchungen bedarf es in jedem Fall eines Einsatzes messtechnischer Verfahren.

Der *Stichprobenumfang* von 12 (Teilstudie 1) und 24 Probanden (Teilstudie 2) sowie 25 (empirische Feldstudie) bzw. 15 Teilnehmern (Evaluierungsphase) ist zu gering, um eine Verallgemeinerung der Ergebnisse und eine repräsentative Analyse herleiten zu können (vgl. BRYMAN, 2008). Darüber hinaus könnte sich die kleine Stichprobe auf die Verteilung der für das Testkonstrukt verfügbaren Daten ausgewirkt haben. Somit wird die Verwendung parametrischer Signifikanztests zur Überprüfung von Hypothesen z. T. verhindert. Dessen inferenzstatistische Aussagekraft ist bekanntermaßen stärker als diejenige von nicht-parametrischen Tests (vgl. ARGRESTI & FINLAY, 2008). Die Forschungsmethodik sollte die Aspekte der „Vertrauenswürdigkeit“ und „Authentizität“ (vgl. GUBA, 1981) der Ergebnisse berücksichtigen, um eine qualitative Forschung gewährleisten zu können. Die im Rahmen des Mixed-Methods-Ansatzes angewendeten verschiedenen Datenerhebungsmethoden (vgl. BRYMAN, 2008) und eine systematische Datenanalysetechnik (vgl. BRAUN & CLARKE, 2012) verhalfen in diesem Zusammenhang zu einer Konsistenz der Ergebnisse.

Die *Reliabilität der Ergebnisse* der experimentellen Untersuchungen sind durch verschiedene Faktoren limitiert. Die Stichproben, d. h. die anhand der beschriebenen Auswahlkriterien gewählte Teilnehmerzahl der Studien, müsste, wie bereits angedeutet, für eine gesicherte Statistik der Ergebnisse erweitert werden. Die Altersstruktur der Probanden (18 bis 35 Jahre) wurde aufgrund der Homogenität der Gruppe und einer erwartbaren ausreichenden Erfahrung im Umgang mit digitalen

bzw. technisch-versierten Endgeräten festgelegt. Es ist außerdem anzunehmen, dass der gesundheitliche Zustand respektive das Fitnesslevel älterer Probanden (über 35 Jahre) im Vergleich zu jüngeren Versuchspersonen differiert. Vor allem in Bezug auf die kognitive Belastung ist eine Eingrenzung des Alters sinnvoll, um mögliche durch Erfahrungen gebildete Schemata als verzerrenden Faktor in der inferenzstatistischen Analyse zu verhindern. Die Teilmenge der Grundgesamtheit umfasste ausschließlich männliche Versuchspersonen. Diese Beschränkung wurde bewusst gewählt, da insbesondere diese Gruppe die untersuchte (Rüst-)Tätigkeit ausführt und etwaige physische Beanspruchungen in Bezug auf weitere Probandenkollektive weitgehend repräsentativ wären. Über die Hälfte des Probandenkollektivs beider Teilstudien setzte sich aus Studenten und Schülern zusammen. Ein Großteil der Versuchspersonen entstammte einer technischen Fachrichtung, sodass deren Profil annähernd der gewünschten Population zuzuordnen ist, d. h. einem (neu) anzulernenden Maschineneinrichter. Tatsächlich üben VP 09 und VP 16 (beide Teilstudie 2) den Beruf des Maschineneinrichters aus, allerdings an Stanzmaschinen bzw. in Bezug auf maschinelle Tiefziehprozesse. Die Ergebnisse sind dementsprechend nur bedingt auf das Fachpersonal im industriellen Umfeld übertragbar, da diese zumindest hinsichtlich der technischen Verrichtung des Prozesses vermeintlich stärker ausgeprägte Vorkenntnisse aufweisen. Weiterhin deutet die Darstellung der Ergebnisse der zweiten Teilstudie darauf hin, dass für die gewählte abhängige Stichprobe nur geringfügig inferenzstatisch signifikante Unterschiede erzielt werden konnten. Die Messwiederholungen der Rüstvorgänge, die in Bezug auf drei Bedingungen bzw. Variablen untersucht wurden, könnten die Ergebnisse trotz der Manipulation respektive Korrektur der Teststatistik zur Minimierung der Auswirkungen von Störfaktoren (vgl. BLANDFORD, 2008) beeinflusst haben. Um tatsächlich bedeutende, signifikante und effektstarke Ergebnisse zu erzielen, wäre eine Untersuchung von jeweils zwei Bedingungen oder Variablen sinnvoll gewesen. Somit hätte ein Vergleich der Rüstprozessdurchführung zum einen mithilfe einer Papier-Instruktion und der HoLoLens-Anwendung im fixierten Fenstermodus und zum anderen die Gegenüberstellung der papierbasierten Anleitung mit dem Tag-along-Modus der Datenbrille für unabhängige Stichproben erfolgen können.

Im Hinblick auf das *elektromyographische Messverfahren* ist insbesondere die Normalisierung der elektromyographischen Aktivität des m. sternocleidomastoideus von besonderer Relevanz. Die zur Relativierung des Kapazitätsmaximums herangezogene Maximalkraftmessung bzw. MVC-Methode wurde nicht gegen einen statischen Widerstand durchgeführt, um Verletzungsrisiken vorzubeugen. Als Konsequenz daraus könnten sich bei diesen Messungen niedrigere Aktivitätswerte des Muskels ergeben haben. Diese Problematik ist allerdings bei bewährten Maximal-

kraftübungen bekannt. Nach STEINHILBER et al. (2013) liegt die Muskelaktivität bei entsprechenden Ausführungen zur maximalen Aktivierung der Muskeln lediglich bei rund 60 bis 80 Prozent der tatsächlichen Kapazität. Darüber hinaus limitiert die gewählte Muskelaktivitätsmessung durch die OEMG die Beobachtung auf ausschließlich an der Oberfläche liegenden Muskeln, sodass einzig Rückschlüsse für eben jene getroffen werden können. Es ist bspw. möglich, dass ein anderer Muskel den limitierenden Faktor in der untersuchten Bewegungsausführung darstellt. Zwar wäre zur Beseitigung dieses Mangels der Einsatz der Nadel-Elektromyographie theoretisch denkbar, aber praktisch innerhalb derartiger Feldstudien im arbeitswissenschaftlichen Kontext nicht umsetzbar. Weiterhin ist das Anbringen der Elektroden mit Schwierigkeiten verbunden. Durch die individuelle Größe und Lage der Muskelstellen bzw. der unterschiedlichen anthropometrischen Bedingungen wird das Palpieren und die entsprechende Applikation der Oberflächen-Elektroden erschwert.

In beiden Teilstudien wurden *externe Störeffekte* durch standardisierte bzw. reproduzierbare Arbeitsumgebungsbedingungen und Anweisungen der Versuchsleitung auf ein Minimum beschränkt, sodass eine schwerwiegende Beeinflussung der Probanden nahezu ausgeschlossen werden konnte. Die klimatischen Bedingungen und die Beleuchtungsstärke konnten einzig im Rahmen der zweiten Teilstudie Schwankungen unterliegen. Die Umgebungsbedingungen der Maschinenhalle, in welcher die Folgestudie durchgeführt wurde, nahmen aufgrund der Raumgröße, der wechselhaften Witterungsbedingungen und des Personenverkehrs leicht variierende Werte an. Mit Letzterem ging ein gelegentliches Öffnen (und Schließen) der sich in der Nähe der einzurichtenden Rotationszugbiegemaschine befindlichen Eingangstür oder des Hallentors einher, woraus kurzzyklische Temperaturschwankungen resultierten. Eine Außentemperatur unter 10 °C gepaart mit den beschriebenen Aspekten führten dazu, dass das Temperaturniveau im Vergleich zur ersten Teilstudie also insgesamt geringfügig niedriger ausfiel. Nichtsdestotrotz sei darauf hingewiesen, dass die Versuchszeiten derart ausgelegt wurden, dass möglichst wenig Störeinflüsse entstehen und für sämtliche Probanden weitgehend identische Bedingungen geschaffen werden konnten. Die beschriebenen Aspekte führen zwangsläufig zu einem veränderten Temperaturprofil des Kopfbereiches. Unabhängig von den Umgebungsbedingungen ist hinsichtlich der thermografischen Wärmebildaufnahmen weiterhin zu bemerken, dass die wiederholte Anwendung der HoloLens zum Ende des jeweiligen Versuchs zu einem erhöhten Temperaturniveau führte, wenngleich die Erhöhung von marginaler Natur und damit nicht schwerwiegend war. Außerdem nimmt ein thermischer Vergleich der Schläfe und des Hinterkopfes aufgrund der unterschiedlichen Kopfbehaarung der Probanden nur einen untergeordneten Stellenwert ein. Standardisierte Arbeitsabläufe gewährleisten weiterhin, dass die Studien einer internen Validität unterliegen (vgl. SARRIS, 1990). Eine ständige limitierende Begleiterscheinung hinsichtlich der internen Validität derartiger Studien ist

jedoch der sogenannte Hawthorne-Effekt (vgl. MCCARNEY, 2007), der beschreibt, dass Probanden aufgrund der eingesetzten Messtechnik und eines damit einhergehenden Beobachtungseffektes möglicherweise ein reales Messergebnis verfälschen bzw. Artefakte ausbilden.

Der erhebliche *Umfang des Testmaterials* in Form von standardisierten und validierten Fragebögen mitsamt der Abschlussbefragungen ist darüber hinaus ein weiterer potenzieller Faktor hinsichtlich einer verminderten Konzentration und einer damit einhergehenden Verzerrung der Messergebnisse. Zumindest konnte durch die unmittelbar im Anschluss an den jeweiligen Rüstvorgang erfolgten Befragungen ein Rezenzeffekt vermieden werden. Die zwischen vier und sechs Stunden andauernde Versuchszeit bedingt jedoch einen möglichen natürlichen Ermüdungseffekt und Konzentrations- sowie Motivationsabfall mit fortschreitender Versuchsdauer. Wenngleich die Montage des LEGO-Bausatzes mitsamt der statischen Blickpositionierungen einen starken experimentellen Charakter aufwies, so konnten jedoch mit dem Rüstvorgang einer Rotationszugbiegemaschine annähernd reale und praxisbezogene Gegebenheiten geschaffen werden.

Trotz der beschriebenen Limitationen bringen die vorgestellten Ergebnisse den Stand der Technik in Bezug auf ein Verständnis voran, wie wissensbasierte und auf AR gestützte CPPS in industriellen Kontexten prozesssicher implementiert werden können.

9.5 Praktische Relevanz der Ergebnisse

Die präsentierten Ergebnisse nehmen für die Praxis eine wichtige Rolle ein, da die vorgestellte Systematik Maschineneinrichter bei komplexen, nicht-automatisierten Rüst- und Montagevorgängen unterstützt. Die vorgestellten Inhalte der Ergonomie, des Wissenstransfers und der Usability bedienen in Bezug auf den Einsatz AR-basierter Unterstützungssysteme im Zuge industrieller Rüstprozesse eine Forschungslücke. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse und mithilfe weiterer Optimierungsmöglichkeiten wird ein prozesssicherer, wertschöpfender und beanspruchungsminimaler Einsatz von AR-Systemen im industriellen Umfeld angestrebt. Die Forschungsarbeiten bringen den Stand der Technik bei der Gestaltung digitaler Technologien bzw. cyberphysischen Systemen zur Unterstützung von Menschen voran, die mit Umrüstprozessen industrieller Produktionsmaschinen betraut sind. Mithilfe der CPPS-Technologie respektive des Zusammenspiels von kontextualisierten Visualisierungen sensorischer Unterstützung und der kombinierten Nutzung von virtuellen und realen Prozessdaten, können die im Rahmen eines Rüstvorgangs demnach beobachteten Mechanismen eines wissensintensiven Prozesses auf eine neue Art und Weise unterstützt und weiterentwickelt werden. Demgegenüber weisen CPPS allerdings auch Einschränkungen auf. Neben Ungenauigkeiten bei der sensorischen Umgebungserfassung und den

daraus resultierenden Abweichungen bei der Darstellung von Rüstinstruktionen können weiterhin Unsicherheiten bezüglich des Datenschutzes entstehen, z. B. hinsichtlich der Aufzeichnung von Laufwegen oder der Weitergabe von spezifischem Erfahrungswissen. Diese (technischen) Barrieren sind nicht ausschließlich auf das Produkt „HoloLens“ der ersten Generation zurückzuführen, sondern eine generelle Herausforderung für aktuelle AR-gestützte und wissensbasierte Systeme. Die sensorische Erfassung von Rüstvorgängen durch die HoloLens und die 3D-Kamera sowie die Möglichkeiten zur Auswertung von Rüstdaten mithilfe eines Rüst-Editors steigern unabhängig von den beschriebenen Limitierungen die Transparenz von Rüstdaten und die Leistung der Arbeitspersonen.

Für den Austausch von Fachwissen wurde insbesondere hinsichtlich der Kontextualität und Kommunikation unter Berücksichtigung kollaborativer Arbeit und sozialer Rahmenbedingungen Fortschritte erzielt, die gleichzeitig neue Forschungsrichtungen zu diesem Thema eröffnen. Weiterhin wurde in diesem Zusammenhang ein wissenschaftlicher Entwicklungsbedarf auf normativer Ebene dadurch deutlich, dass bestehende gesetzliche Vorschriften (z. B. ArbStättV) sowie ergonomische und nutzerzentrierte Richtlinien, wie bspw. die Normenreihe der DIN EN ISO 9241 oder Gestaltungsleitfäden (z. B. der DGUV), eine benutzerfreundliche und kompatible Konzipierung derartiger Systeme mitsamt einer zu empfehlenden Nutzungsdauer insbesondere aufgrund der rasanten technologischen Weiterentwicklung und eines zeitintensiven Normungsprozesses nur bedingt regeln können. In ihrer Arbeit im Kontext der bildgesteuerten Neurochirurgie berichteten NGUYEN et al. (2020), dass sieben von neun Teilnehmern ihrer Nutzerstudie während des Tragens der HoloLens nach 10 bis 15 Minuten Ermüdungserscheinungen verspürten, die sie auf die Gewichtsverteilung zurückführen. Befragungsergebnisse unterschiedlicher Laborstudien mit Fachpersonal zeigen, dass Datenbrillen-Nutzer eine subjektiv akzeptable Nutzungszeit ohne Beeinträchtigungen auf vier bis sechs Stunden pro Schicht einschätzen (vgl. FRIEMERT et al., 2021). An dieser Stelle besteht unabhängig von den beschriebenen Rahmenbedingungen und aufgrund erwartbarer äußerer Belastungseinflüsse auf den Anwender, wie z. B. durch Funkverbindungen entstehende elektromagnetische Felder, Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Zweifelsohne sind die potenziellen Nutzer unabhängig von ihrer Affinität zu technischen Endgeräten und Software für eine die Anwendung einer Datenbrille im betrieblichen Alltag frühzeitig zu sensibilisieren. Bei der Wahl der im Betrieb einzusetzenden Datenbrille ist auch deren Kompatibilität mit Sehhilfen, eine individuelle Korrektur bzw. Anpassung der Sehschärfe und Tragekomfort-Eigenschaften zu beachten, wie bspw. ein angenehmer Sitz des Kopfträgers und die Einhaltung hygienischer Aspekte. Im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung ist das Arbeitssystem in diesem Zusammenhang auf die Arbeitsperson anzupassen, damit diese in einer möglichst neutralen Körperhaltung agieren kann. Sämtliche aus der Anwendung des HMD resultierenden Beschwerden der Nutzer, wie bspw.

muskelphysiologischer, thermischer oder asthenopischer Natur, sollten bei einer dauerhaften betrieblichen Nutzung regelmäßig überprüft werden.

Eine dauerhafte Anwendung der HoloLens bzw. eines vergleichbaren Gerätes ist durch die stetige technologische und ergonomische Weiterentwicklung derartiger Systeme sowie eine interaktions- und beanspruchungsbezogene Gewöhnung sowohl aus Arbeitgeber- bzw. ökonomischer Sicht als auch für Arbeitnehmer respektive Nutzer grundsätzlich vorstellbar. Eine exakte zeitliche Abschätzung einer in Bezug auf die Beanspruchung maximal möglichen Tragedauer des HMD ist durch die individuellen Eigenschaften bzw. Gegebenheiten der Nutzer und des Arbeitskontextes nur bedingt möglich. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass weniger die muskuläre als vielmehr die kognitive Beanspruchung und die Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich einer über mehrere Stunden andauernden Nutzung der Brille entgegenstehen. Vergleichsweise kurzweilige Rüstprozesse von etwa 15 bis 45 Minuten, wie bspw. diejenigen an einer Rotationszugbiegemaschine des Typs „RBV35“ der Firma Wafios, können auch bei einer repetitiven Nutzung der HoloLens durchgeführt werden, ohne dass schwerwiegende gesundheitliche Folgen resultieren. Die kurzweilige Belastung und die Einhaltung von Pausen sind in diesem Zusammenhang unterstützende Faktoren. Inwieweit zeitintensive und umfangreichere Rüstvorgänge (z. B. an großen Tiefziehmaschinen) im Zuge der Datenbrillen-Nutzung einen hinsichtlich eines gesamten Arbeitstages und darüber hinaus stärkeren Effekt auf die Beanspruchung des Anwenders ausüben, muss in Folgestudien untersucht werden. In diesem Zusammenhang ist deutlich zu betonen, dass der in dieser Ausarbeitung herangezogene Untersuchungsgegenstand „HoloLens“ lediglich als Mittel zu dem Zweck diene, eine wissensbasierte AR-unterstützte Systematik zu entwickeln, die Maschineneinrichtern eine effektive Hilfestellung im Zuge der Durchführung von komplexen Rüstvorgängen bietet. Die Effektivität von AR-Systemen wird dabei maßgeblich durch die Art des verwendeten Endgeräts, die Relevanz und Aktualität der Inhalte, die Informationsdarstellung, die Benutzereigenschaften und die Aufgabenmerkmale beeinflusst.

Insbesondere in Zeiten des Fachkräftemangels, hoher Fluktuationsraten und des aufgrund kleiner Losgrößen stetig steigenden Anteils an Rüstvorgängen können unerfahrene oder anzulernende sowie hör- bzw. sehbeeinträchtigte Maschineneinrichter in kurzer Zeit mit dem System und dem zugehörigen Prozess betraut werden. Der im Zuge eines Wissenstransferansatzes elementare Aspekt einer einfachen Zugänglichkeit zu vertrauenswürdigen Lernmaterial ist dadurch gegeben, dass der Instruktioninhalt von einem erfahrenen Kollegen erstellt wurde, der für die Technologie „bürgt“ und somit die Akzeptanz am Arbeitsplatz fördert. Gleichzeitig durchlaufen die Novizen einen Lernprozess, bauen etwaige prozessuale Unsicherheiten ab und eignen sie sich autonom

(Fach-)Wissen an, für dessen Vermittlung in der Regel eine erfahrene Arbeitsperson hätte abgestellt werden müssen. Somit werden personelle Kapazitäten eingespart. Ist die Kommunikation mit einem erfahrenen Mitarbeiter allerdings zwingend erforderlich, bietet z. B. die Microsoft-Technologie bzw. die HoloLens der zweiten Generation eine Remote-Funktion („Dynamics 365 Remote Assist“), über die der inhaltliche Austausch geografisch unabhängig in Echtzeit erfolgen kann. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Maschineneinrichter dem Vorteil der Situation bewusst sind:

„Es ist wahrscheinlich einfacher, die Brille zu nutzen. Man muss einen Kollegen nicht belästigen. Ich vertraue meinen Kollegen und der Brille gleichermaßen, solange ich weiß, dass die Inhalte auf der Brille von meinem Kollegen erstellt wurden“ (TN32).

Die kapazitiven Einschränkungen kleiner und mittelständischer Unternehmen bedingen überdies, dass komplexe operative Prozesse mitunter nicht automatisiert und Rüstschritte z. T. nicht externalisiert werden können. Außerdem entscheiden sich Unternehmen bewusst für manuelle Vorgänge innerhalb der Produktion, um eine strategische Handlungsflexibilität zu bewahren. Der „Expert to Go“ zielt durch dessen konzeptionelle Implementierung des SMED-Ansatzes auf eine lean-orientierte Optimierung von Rüstprozessen ab. Somit stellt das vorgestellte Unterstützungssystem insbesondere für den Mittelstand zumindest mittelfristig eine sinnvolle Lösung zur Durchführung von Rüstprozessen und einer damit einhergehenden Rüstzeitminimierung dar.

Sämtliche Erkenntnisse implizieren allerdings nur einen situativen Ausschnitt, unter welchen praxisbezogenen sowie physischen und psychischen Bedingungen die Nutzung eines AR-basierten HMD im Betriebsalltag für Rüstvorgänge von Industriemaschinen genutzt werden können. Inwieweit ein validierter Prototyp des Unterstützungssystems praktikabel, nutzerzentriert und beanspruchungsminimal auf lange Sicht prozesssicher implementierbar wäre, müssen Langzeitstudien zeigen. Der aus der Begleitstudie ersichtliche fehlerminimale Umgang mit der Datenbrille zeigt zumindest das Potenzial auf, das durch den Einsatz des HMD im Zuge von Rüst- und Montageprozessen geschaffen wird. Für diesen Erfolgseffekt sind allerdings infrastrukturelle und interaktions-sichere Voraussetzungen bei der Nutzung der Technologie zu schaffen, damit anfängliche Zeitverluste, die im Wesentlichen durch die Neuartigkeit der Technik begründet sind, schnellstmöglich eliminiert werden. Neben einer ständigen Verfügbarkeit nimmt auch die Gewährleistung der anwendungsbezogenen Funktionalität des Systems und der damit einhergehenden Aufrechterhaltung der betriebsbezogenen Produktivität eine wichtige Rolle ein. Eine gestenbasierte Steuerung AR-unterstützter Datenbrillen erlaubt bspw. einen freihändigen Betrieb unabhängig von möglicherweise mit Schmutz bedeckten Händen oder des Tragens von Handschuhen, sodass Prozessunter-

brechungen vermieden werden können. Die HoloLens ist zwar autark anwendbar, die vollumfängliche Nutzung des CPPS bzw. der Unterstützung wäre allerdings bei Störungen der internetbasierten Schnittstellen eingeschränkt.

Weiterhin sind Aspekte der Arbeitssicherheit zu berücksichtigen. Die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Arbeitsunfalls ist im Zuge der Nutzung einer Datenbrille insbesondere bei schwer zugänglichen Maschinen oder innerbetrieblichen Barrieren, wie z. B. Stapler- und Personenverkehr oder weitere betriebsbedingte Hindernisse, durch vorherige Einweisungen und ggf. visuelle Sicherheitshinweise (z. B. Piktogramme) im System und an der Maschine bzw. im Produktionsumfeld zu reduzieren. Inwieweit HoloLens-ähnliche Datenbrillen die Funktion einer Schutzbrille übernehmen können und sollen, ist für den spezifischen Anwendungsbereich im Hinblick auf verschiedene Sicherheits- und Qualitätsmerkmale (bspw. hinsichtlich der DIN EN 166, 2002) von der Arbeitgeberseite zu prüfen.

Schlussendlich liefern die Ergebnisse in jedem Fall eine detaillierte Darstellung der Praktiken von Maschineneinrichtern für Rüstvorgänge an Biege- bzw. Umformmaschinen, die in einem CPPS umgesetzt und in diesem Kontext evaluiert wurden. Der Ansatz und die Konzeption orientieren sich zwar an einem spezifischen Anwendungsfall, allerdings können die Erkenntnisse auch auf ähnliche Kontexte, wie bspw. das Rüsten von Stanzmaschinen, übertragen und darin eingesetzt werden. Basierend auf bisherigen Erkenntnissen (siehe Kapitel 4), sollten weitere Potenziale und Herausforderungen auch hinsichtlich der Nutzerakzeptanz und der ergonomischen Limitierungen zum Umgang mit neuartiger Software und Hardware (z. B. AR-Brillen) aufgedeckt werden.

10 Ausblick

Die beschriebenen Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass AR-basierte CPPS Maschinen-einrichter unterstützen, indem sie mithilfe AR-basierter CPPS Wissen und Fachkenntnisse zur Durchführung von industriellen Rüstvorgängen transferieren. Inwieweit das entwickelte Unterstützungssystem bzw. die Basisinfrastruktur tatsächlich für eine alltägliche, langfristige und nachhaltige praktische Nutzung geeignet ist, werden weitere Untersuchungen, bspw. im Rahmen einer im Sinne einer Designfallstudie durchzuführenden Langzeitstudie (vgl. WULF et al., 2015), zeigen müssen. Unabhängig davon können die Erkenntnisse Forscher dazu motivieren, die Forschung zur Anwendung AR- und sensorbasierter CPPS auf andere Wissensgebiete zu übertragen, mögliche Grenzen aufzuzeigen sowie Vergleiche und Synergien herzustellen, um wiederum neue und aufschlussreiche Erkenntnisse hinsichtlich der erfolgsversprechenden Gestaltungsmöglichkeiten und Aneignung der Technologie im industriellen Kontext sowie deren praxisorientierte sowie wissenschaftliche Auswirkungen zu erlangen. In den unterschiedlichen Kontexten stattfindende Wissenstransferprozesse können somit besser verstanden werden.

Die Durchführung von Verfahren zur ergonomischen Bewertung von Arbeit soll im Optimalfall nicht nur Belastungswahrscheinlichkeiten, sondern auch Belastungsschwerpunkte aufzeigen. Dadurch soll dem Anwender die Chance gegeben werden, Optimierungsmöglichkeiten ableiten und umsetzen zu können. Die Anwendung eines im vorliegenden Kontext einzusetzenden Unterstützungssystems strebt per se arbeitsorganisatorische Verbesserungen an, die in einem möglichst beanspruchungsminimalen Prozess münden sollen. Weiterhin soll durch die AR-Anwendung ein nachhaltig leistungssteigernder Einfluss festgemacht werden. Eine Gewöhnung an eine derartige Systematik sowie zu erwartende Optimierungsmaßnahmen der Datenbrille und der Applikation werden zukünftig dazu führen, dass neben der Minimierung der Fehlerrate auch Rüstzeiten weiter reduziert werden können. Die Nutzung der AR-Technologie hat also das Potenzial zur Steigerung der Arbeitseffektivität und -effizienz und letztlich zur Prozesssicherheit beizutragen.

Trotz eines beherrschbaren Arbeitsrisikos können weitere Maßnahmen, wie z. B. die Anwendung höhenverstellbarer Montage- bzw. Werkzeuggestische, getroffen werden, um individuellen Gegebenheiten zu begegnen. Weiterhin gilt es, arbeitssicherheitsrelevante Aspekte zu beachten. Stolper- oder Stoßgefahren und Behinderungen des Laufweges innerhalb des Arbeitsraums, die, wie im vorliegenden Fall, bspw. durch Kabel und Roboter entstehen, müssen, wie schwerwiegende Beeinträchtigungen der Arbeitsumgebung, vermieden werden. Außerdem sollten Mitarbeiter im Rahmen der Arbeitsausführung kontinuierlich auf ergonomische und effektive sowie strukturierte Arbeitsabläufe sensibilisiert werden, um ein bewusstes gesundheitsförderliches und ökonomisches

Verhalten im Umgang mit der Maschine, den Werkzeugen und den Hilfsmitteln anzuregen. Unnötige Bewegungen und etwaige Zwangshaltungen können somit vermieden werden.

Um jegliche dieser AR-Systeme im industriellen Umfeld auf der einen Seite wertschöpfend und andererseits menschenzentriert einsetzen zu können, sind weitere akzeptanzschaffende, normative, konstruktive und technologische Maßnahmen oder Überarbeitungen unabdingbar. Letzteres betrifft z. B. eine Optimierung der Gewichtsverteilung, die Vergrößerung des Sichtfelds oder eine störungsfreie Interaktion. Die Unterstützung von „embodied actions“ ist weitreichend und bedarf neben der (einfachen) Erfassung propositionaler Inhalte, bspw. über Bild- und Videoaufnahmen sowie digitalen oder holografischen Animationen, auch neuartiger technologischer Hilfsmittel, z. B. in Form einer volumetrischen bzw. 4D-Videotechnologie (vgl. CAO et al., 2022). In diesem Zusammenhang wurde ergänzend dazu auch der asynchronen Zusammenarbeit respektive einer Remote-Systematik wenig Beachtung geschenkt (vgl. MARQUES et al., 2022; IRLITTI et al., 2017). Diesen Aspekten muss neben dem allgegenwärtigen Einfluss Künstlicher Intelligenz (vgl. DEVGIRI et al., 2022), der fortschreitenden Technisierung und in Abhängigkeit der gesellschaftspolitischen Entwicklungen und Entscheidungen bei der (Weiter-)Entwicklung und betrieblichen Implementierung von Datenbrillen hinsichtlich der Ausgestaltung einer intelligenten und dennoch zumindest mittelfristig nicht vollständig automatisierten Industrie grundsätzlich nachgegangen werden. In den kommenden Jahren stellt die Kombination von Augmented Reality und Künstlicher Intelligenz dabei für die gesamte Wertschöpfungskette eine vielversprechende Entwicklung dar, da Wirtschaft und Wissenschaft die Bedeutung ihrer Einführung hinsichtlich einer Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit und der Qualifizierung bzw. Ausbildung der Arbeitskräfte erkannt haben. Inwieweit diese dann im Praxisalltag aus ergonomischer und ökonomischer Sicht tatsächlich praktikabel sind, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

11 Literaturverzeichnis

1. AAMODT, A. and E. PLAZA: Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches.
AI Communications 7(1), 39-59 (2001)
2. ABEND, S.: Mehr Durchblick dank Datenbrille? Wie virtuelle Realität die berufliche Teilhabe verbessern kann. <https://www.iab-forum.de/mehr-durchblick-dank-datenbrille-wie-virtuelle-realitaet-die-berufliche-teilhabe-verbessern-kann/>, 2019
3. ACKERMAN, M.S.: Augmenting Organizational Memory: A Field Study of Answer Garden.
ACM Transactions on Information Systems 16(3), 203-224 (1998)
4. ACKERMAN, M.S. and C. HALVERSON: Sharing Expertise: The Next Step for Knowledge Management.
In: HUYSMAN, M. and V. WULF (eds.): *Social Capital and Information Technology*. pp. 273-299, MIT Press, London, 2004
5. ACKERMAN, M.S. and D.W. McDONALD: Answer Garden 2: Merging Organizational Memory with Collaborative Help.
In: ACKERMAN, M.S. (eds.): *Proceedings of the 1996 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*. pp. 97-105, ACM Press, New York, 1996
6. ACKERMAN, M.S.; DACTERA, J.; PIPEK, V. and V. WULF: Sharing Knowledge and Expertise: The CSCW View of Knowledge Management.
Computer-Supported Cooperative Work (CSCW) 22:531-573 (2013)
7. AGRAWALA, M.; PHAN, D.; HEISER, J.; HAYMAKER, J.; KLINGNER, J.; HANRAHAN, P. and B. TVERSKY: Designing Effective Step-by-Step Assembly Instructions.
ACM Transactions on Graphics 22(3), 828-837 (2003)
8. AGRESTI, A. and B. FINLAY: *Statistical Methods for the Social Sciences*. Pearson, Prentice Hall, 2008
9. ANDERSON-LEVITT, K.M.: Ethnography.
In: GREEN, J.L.; CAMILLI, G.; ELMORE, P.B.; SKUKAUKAITI, A. and E. GRACE (eds.): *Handbook of Complementary Methods in Education Research*. pp. 279-298, Lawrence Erlbaum & Associates for AERA, Mahwah, 2006
10. ANGER, H.: Befragung und Erhebung.
In: GRAUMANN, C.F. (Hrsg.): *Sozialpsychologie*. 1. Halbband: Theorien und Methoden, *Handbuch der Psychologie*. S. 567-617, Hogrefe Verlag, Göttingen, 1969
11. APT, W.; SCHUBERT, M. und S. WISCHMANN: *Digitale Assistenzsysteme – Perspektiven und Herausforderungen für den Einsatz in Industrie und Dienstleistungen*. Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin, 2018
12. ARGOTE, L. and P. INGRAM: Knowledge Transfer: A Basis for Competitive Advantage in Firms.
Organizational Behavior and Human Decision Processes 82(1), 150-169 (2000)
13. ARGOTE, L.; BECKMAN, S.L. and D. EPPLE: The Persistence and Transfer of Learning in Industrial Settings.
Management Science 36 (2), 140-154 (1990)

14. ARGOTE, L.; INGRAM, P.; LEVINE, J.M. and R.L. MORELAND: Knowledge Transfer in Organizations: Learning from the Experience of Others.
Organizational Behavior Human Decision Process 82(1):1-8 (2000)
15. AGRESTI, A. and B. FINLAY: Statistical Methods for the Social Sciences. Pearson / Prentice Hall, New Jersey, 2008
16. AYRES, L.: Thematic Coding and Analysis.
In: GIVEN, L.M. (eds.): The Sage Encyclopedia of Qualitative Research Methods. pp. 868-869, SAGE Publications, Thousand Oak, 2016
17. BAIRD, K.M. and W. BARFIELD: Evaluating the Effectiveness of Augmented Reality Displays for a Manual Assembly Task.
Virtual Reality 4(4), 250-259 (1999)
18. BALZERT, H.: Gestaltungsziele der Software-Ergonomie.
In: SCHÖNPFUG, W. und M. WITTSTOCK (Hrsg.): Software-Ergonomie '87 – Nützen Informationssysteme dem Benutzer? Berichte des German Chapter of the ACM. S. 477-488, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1987
19. BANGOR, A.: Display Technology and Ambient Illumination Influences on Visual Fatigue at VDT Workstations.
Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000
20. BANKER, R.D.; POTTER, G. and R.G. SCHROEDER: Reporting Manufacturing Performance Measures to Workers: An Empirical Study.
Journal of Management Accounting Research 5(1), 33-55 (1993)
21. BARDRAM, J. and C. BOSSEN: Mobility Work: The Spatial Dimension of Collaboration at a Hospital.
Computer-Supported Cooperative Work (CSCW) 14(2), 131-160 (2005)
22. BASMAJIAN, J.V. and C.J. DE LUCA: Muscles Alive – Their Functions Revealed by Electromyography. William & Wilkins, Baltimore, 1985
23. BEHRENDTS, J.C.; BISCHOFBERGER, J.; DEUTZMANN, R.; EHMKE, H.; FRINGS, S.; GRISSMER, S.; HOTH, M.; KURTZ, A.; LEIPZIGER, J.; MÜLLER, F.; PEDAIN, C.; RETTIG, J.; WAGNER, C. und E. WISCHMEYER: Physiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2010
24. BEIERSMANN, S.: Microsoft: HoloLens-Akku hält bis zu 5,5 Stunden.
<https://www.zdnet.de/88257168/microsoft-hololens-akku-haelt-bis-zu-55-stunden/>, 2016
25. BENFORD, S.; MARIANI, J.A.; MOLDES, L.N.; PRINZ, W. and T. RODDEN: MOCCA: An Environment for CSCW Applications.
In: Proceedings of the Conference on Organizational Computing Systems. pp. 172-177, ACM, New York, 1993
26. BERG, R. und M. SCHMIDT: Microsoft HoloLens im Test: Ab November in Deutschland erhältlich! <http://www.computerbild.de/artikel/cb-News-PC-Hardware-Microsoft-HoloLens-Test-11242609.html>, 2016
27. BHATTACHARYA, B. and E.H. WINER: Augmented Reality via Expert Demonstration Authoring (AREDA).
Computers in Industry 105, 61-79 (2019)
28. BIRKHAN, C.: Smart Production Systems – Intelligente Konzepte zur Gestaltung von Produktionssystemen. Bosch, Kaiserslautern, 2008

29. BJÖRGVINSSON, E.; EHN, P. and P.A. HILLGREN: Participatory Design and “Democratizing Innovation.”
In: PDC '10: Proceedings of the 11th Biennial Participatory Design Conference. pp. 41-50, 2010
30. BLANDFORD, A.; COX, A.L. and P. CAIRNS: Controlled Experiments.
In: CAIRNS, P.A. and A.L. COX (eds.): Research Methods for Human Computer Interaction. pp. 1-16, Cambridge University Press, Cambridge, 2008
31. BLATTGERSTE, J.; STRENGE, B.; RENNER, P.; PFEIFFER, T. and K. ESSIG: Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks.
In: Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments. pp. 75-82, Association for Computing Machinery, New York, 2017
32. BLOODGOOD, J.M. and W.D. SALISBURY: Understanding the Influence of Organizational Change Strategies on Information Technology and Knowledge Management Strategies.
Decision Support Systems 31(1), 55-69 (2001)
33. BÖHLEMANN, J.: Entwicklung elektromyographischer Methoden zur Beurteilung der ergonomischen Qualität verschiedener Arbeitsmittel und Arbeitsplätze. Shaker Verlag, Aachen, 1997
34. BOGIN, B. and I. VARELA-SILVA: The Body Mass Index: The Good, the Bad and the Horrid.
Bulletin der Schweizerischen Gesellschaft für Anthropologie 18(2), 5-11 (2012)
35. BOKRANZ, R. und K. LANDAU: Einführung in die Arbeitswissenschaft. Eugen Ulmer, Stuttgart, 1991
36. BORCHMANN, L: Regelung des Werkstoffflusses zur Erhöhung der Bauteilqualität beim Rotationszugbiegen.
In: ENGEL, B. (Hrsg.): Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik. Universi, Siegen, 2021
37. BORTZ, J. und C. SCHUSTER: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer, Berlin/Heidelberg, 2010
38. BÜSCHER, M.; LIEGL, M. and V. THOMAS: Collective Intelligence in Crises.
In: MIORANDI, D.; MALTESE, V.; ROVATSOS, M.; NIJHOLT, A. and J. STEWART (eds.): Social Collective Intelligence. pp. 243-265, Springer International Publishing, Cham, 2014
39. BRACHT, U.; GECKLER, D. and WENZEL, S.: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele. Springer, Berlin/Heidelberg, 2011
40. BRAUN, V. and V. CLARKE: Thematic Analysis.
In: COOPER, H.; CAMIC, P.M.; LONG, D.L.; PANTER, A.T.; RINDSKOPF, D. and K.J. SHER (eds.): APA Handbook of Research Methods in Psychology. Research Designs: Quantitative, Qualitative, Neuropsychological, and Biological. Vol. 2, pp. 57-71, American Psychological Association, Washington DC, 2012
41. BRESCIANI, S. and M.J. EPPLER: The Risks of Visualization: A Classification of Disadvantages Associated with Graphic Representations of Information.
In: SCHULZ, P.J.; HARTUNG, U. und S. KELLER (Hrsg.): Identität und Vielfalt der Kommunikationswissenschaft. S. 165-178, UVK, Konstanz, 2009

42. BROMBACH, J.; Analyse, Beurteilung und ergonomische Gestaltung der Arbeitsbedingungen in Arbeitssystemen der industriellen Qualitätskontrolle. Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2005
43. BROWN, J.S. and P. DUGUID: Borderline Issues: Social and Material Aspects of Design. *Human-Computer Interaction* 9(1), 3-36 (1994)
44. BRYMAN, A.: Social Research Methods. Oxford University Press, New York, 2008
45. BUBB, H. und H. SCHMIDTKE: Systemstruktur. Kap. 5.1.
In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie. S. 305-333, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1993
46. BÜTTNER, S.; PRILLA, M. and C. RÖCKER: Augmented Reality Training for Industrial Assembly Work – Are Projection-based AR Assistive Systems an Appropriate Tool for Assembly Training?
In: Conference on Human Factors in Computing Systems – Proceedings. pp. 1-12, 2020
47. BULLINGER, H.-J.: Ergonomie. Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 1994
48. BURKE, J.L.; PREWETT, M.S.; GRAY, A.A.; YANG, L.; STILSON, F.R.B.; COOVERT, M.D.; ELLIOT, L.R. and E. REDDEN: Comparing the Effects of Visual-Auditory and Visual-Tactile Feedback on User Performance: A Meta-Analysis.
In: ICMI'06: 8th International Conference on Multimodal Interfaces, Conference Proceeding. pp. 108-117, 2006
49. BURKHARDT, B.: Enger geht es kaum.
Band Rohre Profile 55(10), 28-29 (2008)
50. BYSTRÖM, K. and K. JÄRVELIN: Task Complexity Affects Information Seeking and Use. *Information Processing & Management* 31, 191-213 (1995)
51. CAGNIE, B.; COOLS, A.; DE LOOSE, V.; CAMBIER, D. and L. DANNEELS: Differences in Isometric Neck Muscle Strength Between Healthy Controls and Women With Chronic Neck Pain: The Use of a Reliable Measurement.
Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 88(11), 1441-1445 (2007)
52. CAKMAKCI, M.: Process Improvement: Performance Analysis of the Setup Time Reduction-SMED in the Automobile Industry.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 41, 168-179 (2009)
53. CAMPBELL, D.J.: Task Complexity: A Review and Analysis.
Academy of Management Review 13, 40-52 (1988)
54. CAO, Y.; FUSTE, A. and V. HEUN: MobileTutAR: A Lightweight Augmented Reality Tutorial System Using Spatially Situated Human Segmentation Videos.
In: Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 1-8, Association for Computing Machinery, New York, 2022
55. CARROLL, J.M: Five Reasons for Scenario-based Design.
Interacting with Computers 13, 43-60 (2000)
56. CARSTENSEN, P.; SCHMIDT, K. and U.K. WIIL: Supporting Shop Floor Intelligence: A CSCW Approach to Production Planning and Control in Flexible Manufacturing.
In: GROUP'99. Proceedings of the International ACM SIGGROUP Conference on Supporting Group Work. pp. 111-120, ACM Press, New York, 1999

57. CAUDELL, T.P. and D.W. MIZELL: Augmented Reality: An Application of Heads-up Display Technology to Manual Manufacturing Processes.
In: Proceedings of the 25th Hawaii International Conference on System Sciences. pp. 659-669, IEEE, New York, 1992
58. CHEN, T. and H.R. TSAI: Ubiquitous Manufacturing: Current Practices, Challenges, and Opportunities.
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 45, 126-132 (2017)
59. CHEN, Y.C.; SHANG, R.A. and C.Y. KAO: The Effects of Information Overload on Consumers' Subjective State Towards Buying Decision in the Internet Shopping Environment.
Electronic Commerce Research and Applications 8(1), 48-58 (2009)
60. CHI, P.P.; AHN, S.; REN, A.; DONTCHEVA, M.; LI, W. and B. HARTMANN: MixT: Automatic Generation of Step-by-Step Mixed Media Tutorials.
In: Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. pp. 93-102, 2012
61. CHONG, C.; KUMAR, S.P. and S. MEMBER: Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges.
Proceedings of the IEEE 91(8) 1247–1256 (2003)
62. CLARKE, K.; HUGHES, J.; MARTIN, D.; ROUNCFIELD, M.; SOMMERVILLE, I.; GURR, C.; HARTSWOOD, M.; PROCTER, R.; SLACK, R. and A. VOSS: Dependable Red Hot Action.
In: KUUTTI, K.; KARSTEN, E.H.; FITZPATRICK, G.; DOURISH, P. and K. SCHMIDT (eds.): Proceedings of the 8th European Conference on Computer-Supported Cooperative Work. pp. 61-80, Springer Netherlands, Dordrecht, 2003
63. CLAUB, G. und H. EBNER: Grundlagen der Statistik für Psychologen, Pädagogen und Soziologen. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt a.M./Zürich, 1972
64. COHEN, J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Erlbaum, Hillsdale, 1988
65. COMETTI, C.; PAİZIS, C.; CASTELEIRA, A.; PONS, G. and N. BABAULT: Effects of Mixed Reality Head-Mounted Glasses During 90 Minutes of Mental and Manual Tasks on Cognitive and Physiological Functions.
PeerJ 6(4), e5847 (2018)
66. COWLES, M. and C. DAVIS: On the Origins of the 0.05 Level of Significance.
American Psychologist 37, 553-558 (1982)
67. CRABTREE, A.; HEMMINGS, T. and T. RODDEN: Pattern-based Support for Interactive Design in Domestic Settings.
In: Proceedings of the 4th Conference on Designing Interactive Systems. pp. 265-276, ACM, New York, 2002
68. CRESWELL, J.W.; CLARK, V.L.P.; GUTMANN, M. and W.E. HANSON: An Expanded Typology for Classifying Mixed Methods Research into Designs Editors' Introduction. Handbook of Mixed Methods in Social and Behavioral Research. pp. 209-240, SAGE, Thousand Oaks, 2007
69. CRESWELL, J.W.: Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. SAGE Publications Inc., Los Angeles/London/New Delhi, 2014
70. CZERULLA, H.A. und J.-K. JANSSEN: Microsoft HoloLens im Test: Tolle Software, schwaches Display. <https://www.heise.de/ct/artikel/Microsoft-HoloLens-im-Test-Tolle-Software-schwaches-Display-3248670.html>, 2016

71. D'AMATO, R.; CUTOLO, F.; BADIALI, G.; CARBONE, M.; LU, H.; HOGENBIRK, H. and V. FERRARI: Key Ergonomics Requirements and Possible Mechanical Solutions for Augmented Reality Head-Mounted Displays in Surgery.
Multimodal Technologies and Interaction 6(2), 15 (2022)
72. DARBY, S.: The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption. A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and direct Displays. pp. 1-21, Environmental Change Institute, University of Oxford, Oxford, 2006
73. DE JONG, T.: Cognitive Load Theory, Educational Research, and Instructional Design: Some Food for Thought.
Instructional Science 38(2), 105-134 (2010)
74. DE JONG, T. and M.G.M. FERGUSSON-HESSLER: Types and Qualities of Knowledge.
Educational Psychologist 31, 105-113 (1996)
75. DE MICHELIS, G. and M.A. GRASSO: Situating Conversations Within the Language/Action Perspective: The Milan Conversation Model.
In: Proceedings of the 1994 ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work. pp. 89-100, ACM, New York, 1994
76. DEPPE, S.; BRÜNNINGHAUS, M.; VOIT, M. und C. RÖCKER: Anwendungsszenarien für AR in der Produktion: Use Cases und Technologielösungen.
HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 59, 351-366 (2022)
77. DEVAGIRI, J.S.; PAHEDING, S.; NIYAZ, Q.; YANG, X. and S. SMITH: Augmented Reality and Artificial Intelligence in Industry: Trends, Tools, and Future Challenges.
Expert Systems with Applications 207, 118002 (2022)
78. DEY, A.; BILLINGHURST, M.; LINDEMAN, R.W. and J.E. SWAN: A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014.
Frontiers in Robotics and AI 5, 2018
79. DENEFF, S. and D. KEYSON: Talking About Implications for Design in Pattern Language.
In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 2509-2518, ACM, New York, 2012
80. DGE (Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.) (Hrsg.): Ernährungsbericht 1992, Frankfurt a.M., 1992
81. DIGGINS, T. and P. TOLMIE: The 'Adequate' Design of Ethnographic Outputs for Practice: Some Explorations of the Characteristics of Design Resources.
Personal Ubiquitous Computing 7(3-4), 147-158 (2003)
82. DISALVO, C.; CLEMENT, A. and V. PIPEK: Participatory Design For, With, and By Communities.
In: SIMONSEN, J. and T. ROBERTSON (eds.): International Handbook of Participatory Design. pp. 182-209, Routledge, Oxford, 2013
83. DIVITINI, M.; SALÈ, G.O.; POZZOLI, A. and C. SIMONE: Supporting the Dynamics of Knowledge Sharing Within Organizations.
In: Proceedings of the Conference on Organizational Computing Systems. pp. 178-183, ACM, New York, 1993
84. DÖRING, H.: Wissensmanagement in Familienunternehmen. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016
85. DÖRNER, R.; BROLL, W.; GRIMM, P. und B. JUNG: Virtual und Augmented Reality (VR/AR). Springer, Berlin/Heidelberg, 2019

86. DROUOT, M.; LE BIGOT, N.; BRICARD, E.; DE BOUGRENET, J.-L. and V. NOURRIT: Augmented Reality on Industrial Assembly Line: Impact on Effectiveness and Mental Workload.
Applied Ergonomics 103, 103793 (2022)
87. DUNSTON, P.S. and D.H. SHIN: Key Areas And Issues For Augmented Reality Applications On Construction Sites.
In: WANG, X. and M.A. SCHNABEL (eds.): *Mixed Reality In Architecture, Design And Construction*. pp. 157-170, Springer Netherlands, Dordrecht, 2009
88. EINARS, W.: Elektromyographische als arbeitswissenschaftliche Methode zur Beurteilung von lokaler Belastung, Beanspruchung und Ermüdung bei dynamischer Muskelarbeit. Dissertation am Lehrstuhl am Institut für Arbeitsphysiologie der TU München, München, 1979
89. ELLEGAST, R.: Verfahren zur Bewertung von manuellen Lastenhandhabungen.
In: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (Hrsg.): *BGIA-Report 4/2005: Fachgespräch Ergonomie 2004*. Sankt Augustin, 2005
90. ENGEL, B. und C. MATHES: Erweiterung der Prozessfähigkeit des Rotationszugbiegens durch ein alternatives Faltenglätterkonzept. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB), Hannover, 2013
91. ENGEL, B.; KUHNHEN, C.; MATHES, C.; GROTH, S.; FROHN, P. and C. HEFTRICH: A New Approach for Quantitative Evaluation of Bending Components.
In: *Metalforming 2014*. S. 1095-1102, 2014
92. EPPLER, M.J. and J. MENGIS: The Concept of Information Overload – A Review of Literature from Organization Science, Accounting, Marketing, MIS, and Related Disciplines.
The Information Society: An International Journal 20, 1-20 (2004)
93. ERNST, J.: Elektromyographische und biomechanische Analysen zur Optimierung von horizontalen Umsetzrichtungen. Fortschrittbericht VDI Reihe 17 Nr. 56. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
94. EVANS, G.; MILLER, J.; IGLESIAS PENA, M.; MACALLISTER, A. and E. WINER: Evaluating the Microsoft HoloLens Through an Augmented Reality Assembly Application
In: *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers 10197 – Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display*, 2017
95. FAKOURFAR, O.; TA, K.; TANG, R.; BATEMAN, S. and A. TANG: Stabilized Annotations for Mobile Remote Assistance.
In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. pp. 1548-1560, ACM, New York, 2016
96. FALLER, C. and D. FELDMÜLLER: Industry 4.0 Learning Factory for Regional SMEs.
Procedia CIRP 32, 88-91 (2015)
97. FEINBERG, S. and M. MURPHY: Applying Cognitive Load Theory to the Design of Web-based Instruction.
In: *18th Annual Conference on Computer Documentation. IPCC/SIGDOC 2000: Technology and Teamwork – Proceedings*, IEEE Professional Communication Society International Professional Communication Conference and ACM Special Interest Group on Documentation Conference. pp. 353-360, 2000
98. FEINER, S.; MACINTYRE, B. and D. SELIGMANN: Knowledge-based Augmented Reality.
Communications of the ACM 36(7), 53-62 (1993)

99. FIELD, A.: *Discovering Statistics Using SPSS*. SAGE Publication, London, 2009
100. FILLATREAU, P.; FOURQUET, J.Y.; LE BOLLOC'H, R.; CAILHOL, S.; DATAS, A. and B. PUEL: Using Virtual Reality and 3D Industrial Numerical Models for Immersive Interactive Checklists. *Computers in Industry* 64(9), 1253-1262 (2013)
101. FIORENTINO, M.; UVA, A.E.; GATTULLO, M.; DEBERNARDIS, S. and G. MONNO: Augmented Reality on Large Screen for Interactive Maintenance Instructions. *Computers in Industry* 65(2), 270-278 (2014)
102. FISHER, R.A.: *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd, London, 1925
103. FISHER, R.A. and R. YATES: *Statistical Tables for Biological, Agricultural, and Medical Research*. Longman Group Ltd., Edinburgh, 1974
104. FRAGA-LAMAS, P.; FERNÁNDEZ-CARAMÉZ, T.M.; BLANCO-NOVOA, Ó. and M.A. VILAR-MONTESIONS: A Review on Industrial Augmented Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access* 6, 13358-13375 (2018)
105. FREUNDORFER, S.: VR-Wissen: Was ist der Unterschied zwischen Virtual Reality, Mixed Reality und Augmented Reality? <https://vr-world.com/unterschied-virtual-reality-mixed-reality-augmented-reality/>, 2016
106. FRIEDRICH, W.: ARVIKA: Augmented Reality for Development, Production and Service. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. pp. 3-4, 2002
107. FRIELING, E. und K. SONNTAG: *Lehrbuch Arbeitspsychologie*. Huber, Bern/Göttingen/Toronto/Seattle, 1999
108. FRIEMERT, D.; ELLEGAST, R. and U. HARTMANN: Data Glasses for Picking Workplaces – Impact on Physical Workloads. *HCI* 22, 281-289 (2016)
109. FRIEMERT, D.; KAUFMANN, M.; HARTMANN, U. and R. ELLEGAST: First Impressions and Acceptance of Order Pickers Towards Using Data Glasses at a Simulated Workstation. In: DUFFY, V. (eds.): *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Human Body and Motion. HCII 2019. Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, Cham, 2019
110. FRIEMERT, D.; TERSCHÜREN, C.; GROß, B.; HEROLD, R.; LEUTHNER, N.; BRAUN, C.; HARTMANN, U. and V. HARTH: What Is the State of Smart Glass Research from an OSH Viewpoint? A Literature Review. In: DUFFY, V. and G. VINCENT (eds.): *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management, Human Communication, Organization and Work*. pp. 346-364, Springer International Publishing, Cham, 2020
111. FRIEMERT, D.; HARTMANN, U.; TERSCHÜREN, C.; LAUN, M.; CZECH, C.; JUNGK, P.; WIENKE, M.; WEBER, A.; KARAMANIDIS, K.; WERTH, J.; ALTEKÖSTER, C.; ELLEGAST, R.; GROSS, B.; SCHIEFER, C.; HEROLD, R.; DAMERAU, L. und V. HARTH: Auswirkungen von Datenbrillen auf Arbeitssicherheit und Gesundheit (ADAG) – Checkliste zu Handlungsempfehlungen. <https://www.dguv.de/medien/fb-handelundlogistik/pdf-dokumente/adag-handlungsempfehlungen.pdf>, 2021

112. FRIGO, M.A.; DA SILVA, E.C.C. and G.F. BARBOSA: Augmented Reality in Aerospace Manufacturing: A Review.
Journal of Industrial and Intelligent Information 4(2), 125-130 (2016)
113. FUNK, M.; KOSCH, T. and A. SCHMIDT: Interactive Worker Assistance: Comparing the Effects of In-Situ Projection, Head-Mounted Displays, Tablet, and Paper Instructions.
In: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. pp. 934- 939, 2016
114. GABBARD, J.; MEHRE, D. and J. SWANN: Effects of AR Display Context Switching and Focal Distance Switching on Human Performance.
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 25(6), 2228-2241 (2019)
115. GALLAGHER, S.: Merleau-Ponty's Phenomenology of Perception.
Topoi – An International Review of Philosophy 29(2), 183-185 (2010)
116. GARRETT, G.A.; REID, C.R.; JENKINS, M.; TALBOT, T. and S. DOHERTY: Effects of Prolonged Use of Mixed Reality Systems in Occupational Settings Discussion Panel.
Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 62(1), 2104-2106 (2018)
117. GAUGLITZ, S.; LEE, C.; TURK, M. and T. HÖLLERER: Integrating the Physical Environment into Mobile Remote Collaboration.
In: Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services. pp. 241-250, ACM, New York, 2012
118. GAUGLITZ, S.; NUERNBERGER, B.; TURK, M. and T. HÖLLERER: In Touch with the Remote World: Remote Collaboration with Augmented Reality Drawings and Virtual Navigation.
In: Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. pp. 197-205, ACM, New York, 2014a
119. GAUGLITZ, S.; NUERNBERGER, B.; TURK, M. and T. HÖLLERER: World-Stabilized Annotations and Virtual Scene Navigation for Remote Collaboration.
In: Proceedings of the 27th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. pp. 449-459, ACM, New York, 2014b
120. GEARY, K.; GREEN, B.S. and E. DELAHUNT: Intrarater Reliability of Neck Strength Measurement of Rugby Union Players Using a Handheld Dynamometer.
Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics 36(7), 444-449 (2013)
121. GEKLE, M. und D. SINGER: Temperaturregulation und Wärmehaushalt.
In: KLINKE, R.; PAPE, H.-C.; KURTZ, A. und S. SILBERNAGL (*Hrsg.*): Physiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York, 2010
122. GELLERSEN, H.: Smart-Its: Computers for Artifacts in the Physical World.
Communications of the ACM 48(3), 66 (2005)
123. GENTNER, D. and A.L. STEVENS: Mental Models. Taylor and Francis, Hoboken, 2014
124. GERBERICH, T.: Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie. Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl. Springer Gabler, Wiesbaden, 2011
125. GIBSON, W. and A. BROWN: Working with Qualitative Data. SAGE, Los Angeles, 2009
126. GOODWIN, C.: Professional Vision.
American Anthropologist 96(3), 603-633 (1994)

127. GONZALEZ, A.V.; KOH, S.; KAPALO, K.; SOTTILARE, R.; GARRITY, P.; BILLINGHURST, M. and J. LAVIOLA: A Comparison of Desktop and Augmented Reality Scenario Based Training Authoring Tools.
In: Proceedings – 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. pp. 339-350, 2019
128. GOOMAS, D.T.: Immediate Feedback on Accuracy and Performance: The Effects of Wireless Technology on Food Safety Tracking at a Distribution Center.
Journal of Organizational Behavior Management 32(4): 320-328 (2012)
129. GOOMAS, D.T.; SMITH, S.M. and T.D. LUDWIG: Business Activity Monitoring: Real-Time Group Goals and Feedback Using an Overhead Scoreboard in a Distribution Center.
Journal of Organizational Behavior Management 31(3), 196-209 (2011)
130. GOPHER, D. and E. DONCHIN: Workload – An Examination of the Concept.
In: BOFF, K.R.; KAUFMANN, L. and J.P. THOMAS (eds.): Handbook of Perception and Human Performance. John Wiley & Sons, New York, 1986
131. GOSSET, W.S.: The Probable Error of the Mean.
Biometrika 6, 1-25 (1908)
132. GRANT, R.M.: Toward a Knowledge-based Theory of the Firm.
Strategic Management Journal 17(S2), 109-122 (1996)
133. GRANT, R.M. and C. BADEN-FULLER: A Knowledge Accessing Theory of Strategic Alliances.
Journal of Management Studies 41(1), 61-84 (2004)
134. GRIEMERT, S.: Rüstzeiten – Das ungehobene Potenzial.
Wissenschaftliche Schriften des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Koblenz 23 (2017)
135. GUBA, E.G.: Criteria for Assessing the Trustworthiness of Naturalistic Inquiries.
Educational Technology Research and Development 29(2), 75-91 (1981)
136. GUETTERMAN, T.C., FETTERS, M.D. and J.W. CRESWELL: Integrating Quantitative and Qualitative Results in Health Science Mixed Methods Research through Joint Displays.
Annals of Family Medicine 13(6), 554-561 (2015)
137. HACKER, W.: Software-Ergonomie; Gestalten Rechnergestützter Geistiger Arbeit?
In: SCHÖNPFLUG, W. und M. WITTSTOCK (Hrsg.): Software-Ergonomie '87: Nützen Informationssysteme dem Benutzer? Berichte des German Chapter of the ACM. S. 31-54, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1987
138. HACKER, W.: Arbeitsanalyse zur prospektiven Gestaltung der Gruppenarbeit.
In: ANTONI, C.H. (Hrsg.): Gruppenarbeit in Unternehmen. S. 49-80, Beltz Psychologie Verlag Union, Weinheim, 1994
139. HANSON, R.; FALKENSTRÖM, W. and M. MIETTINEN: Augmented Reality as a Means of Conveying Picking Information in Kit Preparation for Mixed-Model Assembly.
Computers & Industrial Engineering 113, 570-575 (2017)
140. HARPER, R.; PROCTER, R.; RANDALL, D. and M. ROUNCFIELD: 'Safety in Numbers': Calculation and Document Re-use in Knowledge Work.
In: Proceedings of the 2001 International ACM SIGGROUP Conference on Supporting Group Work. pp. 242-251, ACM, New York, 2001
141. HART, S.G.: NASA-TASK LOAD INDEX (NASA-TLX); 20 YEARS LATER. NASA-Ames Research Center, Moffett Field, 2006

142. HART, S.G. and L.E. STAVELAND: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. North Holland Press, Amsterdam, 1988
143. HASLE, P.; BOJESEN, A.; JENSEN, P.L. and P. BRAMMING: Lean and the Working Environment: A Review of the Literature.
International Journal of Operations and Production Management 32, 829-849 (2012)
144. HAU, Y.S.; KIM, B.; LEE, H. and Y.G. KIM: The Effects of Individual Motivations and Social Capital on Employees' Tacit and Explicit Knowledge Sharing Intentions.
International Journal of Information Management 33(2), 356-366 (2013)
145. HEATH, C. and P. LUFF: Disembodied Conduct: Communication through Video in a Multi-Media Office Environment.
In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 99-103, ACM, New York, 1991
146. HEEG, F.J.: Empirische Software-Ergonomie. Zur Gestaltung benutzergerechter Mensch-Computer-Dialoge. Springer, Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokio, 1988
147. HEGENBERG, J. und L. SCHMIDT: Augmented-Reality-basierte Assistenz für das Anlernen Manueller und Roboterunterstützter Montageprozesse.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (2021)
148. HELD, J.: Ergonomie. BG ETEM Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln, 2014
149. HELLER, B.; CHATTI, S.; SCHIKORRA, M.; TEKKAYA, A. und M. KLEINER: Blechbiegen.
In: SIEGERT, K. (Hrsg.): Blechumformung. Springer, Berlin/Heidelberg, S. 141-216, 2015
150. HENDERSON, S. and S. FEINER: Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair.
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 17(10), 1355-1368 (2011)
151. HENRYSSON, A.; OLLILA, M. and M. BILLINGHURST: Mobile Phone based AR Scene Assembly.
In: Proceedings of the 4th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM). pp. 95-102, ACM, New York, 2005
152. HERMANOWICZ, J.C.: The Great Interview: 25 Strategies for Studying People in Bed.
Qualitative Sociology 25(4), 479-499 (2002)
153. HERMSEN, S.; FROST, J.; RENES, R.J. and P. KERKHOF: Using Feedback Through Digital Technology to Disrupt and Change Habitual Behavior: A Critical Review of Current Literature.
Computers in Human Behavior 57, 61-74 (2016)
154. HERTERICH, M.; UEBERNICKEL, F. and W. BRENNER: The Impact of Cyber-Physical Systems on Industrial Services in Manufacturing.
Procedia CIRP 30, 323-328 (2015)
155. HEUER, H. and T. ROEMER: Rest Position of the Eyes and its Effect on Viewing Distance and Visual Fatigue in Computer Display Work.
Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie 36(4), 538-566 (1989)

156. HESSE, J.M.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Gehörschädlichkeit von Impulsschall. Dissertation im Fachbereich Maschinentechnik der Universität Siegen, Siegen, 1994
157. HETTINGER, T.: Isometrisches Muskeltraining. Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech, 1994
158. EINARS, W.: Elektromyographische als arbeitswissenschaftliche Methode zur Beurteilung von lokaler Belastung, Beanspruchung und Ermüdung bei dynamischer Muskelarbeit. Dissertation am Lehrstuhl am Institut für Arbeitsphysiologie der TU München, München, 1979
159. HICKLEY, A.: Verbatim, Intelligent Verbatim or Edited Transcription? <http://penguin-transcription.co.uk/transcription-type-verbatim-intelligent-verbatim-or-edited/>, 2016
160. HIETANEN, A.R.; PIETERS, R.; LANZ, M.; LATOKARTANO, J. and J.K. KAMARAINEN: AR-based Interaction for Human-Robot Collaborative Manufacturing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 63, 1-9 (2020)
161. HOEHNE-HÜCKSTÄDT, U. und D. DITCHEN: Kooperationsprojekt MEGAPHYS: Entwicklung eines Methodenpakets zur Gefährdungsanalyse bei physischen Belastungen. https://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/veranst/dokumente/20141218_megaphys.pdf, 2014
162. HOEL, P.G.: Introduction to Mathematical Statistics. Wiley, New York, 1971
163. HOFFMANN, A.: Entwicklung eines Ordnungsrahmens zur Analyse von intraorganisationalem Wissenstransfer. Dissertation an der Goethe-Universität Frankfurt a.M., Frankfurt a.M., 2009
164. HOLTZBLATT, K. and S. JONES: Contextual Inquiry: A Participatory Technique for System Design. In: SCHULER, D. and A. NAMIOKA (eds.): Participatory Design: Principles and Practices. pp. 177-210, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 2017
165. HOLZWARTH, B.: Microsoft HoloLens im industriellen Einsatz. <https://www.i40-magazin.de/fachartikel/microsoft-hololens-im-industriellen-einsatz/>, 2017
166. HOOVER, M.; MILLER, J. and E. WINER: Overcoming Limitations of the HoloLens for Use in Product Assembly. *The Engineering Reality of Virtual Reality* 2019(9), 179-1-179-9
167. HOŘEJŠÍ, P.: Augmented Reality System for Virtual Training of Parts Assembly. *Procedia Engineering* 100, 699-706 (2015)
168. HOU, L.; WANG, X.; BERNOLD, L. and P.E.D. LOVE: Using Animated Augmented Reality to Cognitively Guide Assembly. *Journal of Computing in Civil Engineering* 27(5), 439-451 (2013)
169. HU, F.; LU, Y.; VASILAKOS, A.V.; HAO, Q.; MA, R.; PATIL, Y.; ZHANG, T.; LU, J.; LI, X. and N.N. XIONG: Robust Cyber-Physical Systems: Concept, Models, and Implementation. *Future Generation Computer Systems* 56, 449-475 (2016)
170. IRLE, H.O.: Experimentelle Untersuchungen zur Energieäquivalenz bei akustischen Belastungen und zur Beurteilung kombinierter Belastungen am Arbeitsplatz. Dissertation im Fachbereich Maschinentechnik an der Universität Siegen, Siegen, 1998

171. IRLITTI, A.; SMITH, R.T.; VON ITZSTEIN, S.; BILLINGHURST, M. and B.H. THOMAS: Challenges for Asynchronous Collaboration in Augmented Reality. In: Adjunct Proceedings of the 2016 I.E. International Symposium on Mixed and Augmented Reality. pp. 31-35, IEEE, New York, 2017
172. ITO, K.; TADA, M.; UJIKE, H. and K. HYODO: Effects of the Weight and Balance of Head-Mounted Displays on Physical Load. *Applied Sciences* 11(15), 6802 (2021)
173. JANCZYK, M. und R. PFISTER: Inferenzstatistik verstehen. Springer, Berlin/Heidelberg, 2013
174. JANSSEN, S. und K. MÖLLER: Erfolgreiche Steuerung von Innovationsprozessen und -projekten – Ergebnisse einer empirischen Studie. *Zeitschrift für Controlling & Management* 55(2), 97-104 (2011)
175. JEFFRI, N.F.S. and D.R.A. RAMBLI: A Review of Augmented Reality Systems and Their Effects on Mental Workload and Task Performance. *Heliyon* 7(3), e06277 (2021)
176. JENSEN, M.B.; JOHNSON, B.; LORENZ, E. and B.Å. LUNDVALL: Forms of Knowledge and Modes of Innovation. *Research Policy* 36, 680-693 (2007)
177. JO, G.S.; OH, K.J.; HA, I.; LEE, K.S.; HONG, M.D.; NEUMANN, U. and S. YOU: A Unified Framework for Augmented Reality and Knowledge-based Systems in Maintaining Aircraft. *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence* 4, 2990-2997 (2014)
178. JOHANNSEN, G.; MORAY, N.; PEW, R.; RASMUSSEN, J.; SANDERS, A. and C. WICKENS: Final Report of Experimental Psychology Group. In: MORAY, N. (eds.): *Mental Workload, Its Theory and Measurement*. pp. 101-114, Plenum Press, New York, 1979
179. JOHN, B.: *Statistische Verfahren für Technische Messreihen*. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1979
180. JOHNSON-LAIRD, P.N.: *Mental Models. Towards a Cognitive Science of Language, Inference and Consciousness*. Harvard University Press, Cambridge, 1983
181. KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W. and J. HELBIG: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. National Academy of Science and Engineering, Frankfurt a.M., 2013
182. KALYUGA, S.: Expertise Reversal Effect and Its Implications for Learner-Tailored Instruction. *Educational Psychology Review* 19(4), 509-539 (2007)
183. KALYUGA, S.; AYRES, P.; CHANDLER, P. and J. SWELLER: The Expertise Reversal Effect. *Educational Psychologist* 38, 23-31 (2003)
184. KAMPMANN, B.: *Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und aus Feldstudien im Steinkohlebergbau*. Habilitationsschrift, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal, 2000
185. KANTOWITZ, B.H. and J.L. CAMPBELL: Pilot Workload and Flightdeck Automation. In: PARASURAMAN, R. and M. MOULOUA (eds.): *Automation and Human*

- Performance: Theory and Applications. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, 1996
186. KARRER, K.; GLASER, C.; CLEMENS, C. und C. BRUDER: Technikaffinität erfassen – der Fragebogen TA-EG.
In: LICHTENSTEIN, A.; STÖBEL, C. und C. CLEMENS (Hrsg.): Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme.
ZMMS Spektrum 22(29), 196-201 (2009)
187. KELTON, A.S.; PENNINGTON, R.R. and B.M. TUTTLE: The Effects of Information Presentation Format on Judgment and Decision Making: A Review of the Information Systems Research.
Journal of Information Systems 24(2), 79-105 (2010)
188. KENDON, A.: Conducting Interaction: Patterns of Behavior in Focused Encounter. Cambridge University Press, Cambridge, 1990
189. KEYS, A.; FIDANZA, F.; KARVONEN, M.J.; KIMURA, N. and H.L. TAYLOR: Indices of Relative Weight and Obesity.
Journal on Chronic Diseases 25, 329-343 (1972)
190. KIM, S. and A.K. DEY: Simulated Augmented Reality Windshield Display as a Cognitive Mapping Aid for Elder Driver Navigation.
In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 133-142, 2009
191. KIM, S.; NUSSBAUM, M. and J. GABBARD: Influences of Augmented Reality Head-Worn Display Type and User Interface Design in Performance and Usability in Simulated Warehouse Order Picking.
Applied Ergonomics 74, 186-193 (2019)
192. KIRCHNER, J.-H.: Belastungen und Beanspruchungen – Einige begriffliche Klärungen zum Belastungs-Beanspruchungs-Konzept.
In: HACKSTEIN, R.; HEEG, F.-J. und F. VON BELOW (Hrsg.): Arbeitsorganisation und Neue Technologien. S. 553-569, Springer, Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokio, 1986
193. KLOPFER, E.; PERRY, J.; SQUIRE, K. and M. JAN: Collaborative Learning Through Augmented Reality Role Playing.
In: Proceedings of the 2005 Conference on Computer Support for Collaborative Learning: Learning 2005: The Next 10 Years! pp. 311-315, International Society of the Learning Sciences, Taipei, 2005
194. KLUTH, K.: Physiologische Kosten repetitiver Bewegungen an planzeitorientierten Montagearbeitsplätzen mit sitzender Tätigkeitsausführung. Höpner und Göttert, Siegen, 1996
195. KLUTH, K.: Analyse, Beurteilung und ergonomische Gestaltung von Arbeitsplätzen in Selbstbedienungsläden. Habilitationsschrift (mit "venia legendi" für Arbeitswissenschaft – Ergonomie und Arbeitsschutz). Höpner und Göttert, Siegen, 2001
196. KLUTH, K. und H. STRASSER: Re-Evaluierung der Arbeitsbedingungen in Filialen der Unternehmensgruppe ALDI-Süd aus ergonomischer Sicht (Abschlussbericht) – Re-Evaluation of the Working Conditions in the Shops of "ALDI-Süd" from an Ergonomics Point of View (Final Report). Fachgebiet Arbeitswissenschaft/Ergonomie, Universität Siegen, Siegen, 1998

197. KLUTH, K. und H. STRASSER: Evaluierung eines neu entwickelten Linksabweiser-Scanner-Kassensystems im Vergleich zu einem konventionellen Registrier-Kassensystem mit subjektiven und elektromyographischen Methoden – Evaluation of a Newly Developed Scanner Checkout with Goods Throughput from Left to Right in Comparison with a Conventional Keyboard Checkout Using Subjective and Electromyographic Methods. Zweisprachiger Bericht zu einem Industrieprojekt, Siegen, 2000
198. KLUTH, K. und H. STRASSER: Bericht über die ergonomische Evaluierung der Arbeitsbedingungen und Objektivierung der Beanspruchung des Personals mit arbeitsphysiologischen Methoden sowie subjektive Beurteilung der Arbeitsbedingungen von Tiefkühlhauskommissionierern. Fachgebiet für Arbeitswissenschaft/Ergonomie Universität Siegen, Siegen, 2001
199. KLUTH, K.; EICHERT, M. und H. STRASSER: Felduntersuchung der Arbeitsbedingungen an Arbeitsplätzen in Filialen eines Discount-Unternehmens. Bericht zu einem Industrieprojekt, Siegen, 1997
200. KLUTH, K.; PAULY, O. und H. STRASSER: Evaluierung der ergonomischen Qualität von Strahlrohren zur Brandbekämpfung mittels elektromyographischer und subjektiver Methoden. Bericht zu einem Industrieprojekt, Siegen, 1999
201. KOBER, M.; SCHEVE, J. und A. DAHM: Rüstoptimierung – Das Ziel sind kurze Durchlaufzeiten.
Betriebspraxis & Arbeitsforschung 222, 10-15 (2014)
202. KOELLE, M.; EL ALI, A.; COBUS, V.; HEUTEN, W. and S.C.J. BOLL: All about Acceptability? Identifying Factors for the Adoption of Data Glasses.
In: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Association for Computing Machinery. pp. 295-300, ACM, New York, 2017
203. KOLBOW-LEHRADT, B.: Microsoft HoloLens angetestet: Ich sehe was, was du nicht siehst.
<http://www.netzpiloten.de/microsoft-hololens-angetestet-augmented-reality-brille/>, 2016
204. KONRAD, P.: EMG-FIBEL. Eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologicalische Elektromyographie. NORAXON U.S.A. INC., Scottsdale, 2011
205. KORTE, J.: Biegen, Messen und Nachbiegen in einem Arbeitsschritt.
Maschinenmarkt 58(14), 27 (2013)
206. KOSSLYN, S.M.: Graph Design for the Eye and Mind. Oxford University Press, New York, 2006
207. KUCKARTZ, U.; RÄDIKER, S.; EBERT, T. und J. SCHEHL: Statistik. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
208. KUHNEN, C.; ENGEL, B.; ZEHNER, B.-U. und E. ALLES: FE-Simulation zur Ermittlung der Widerstandskräfte gebogener Rohrkonstruktionen in Abhängigkeit der Faltenbildung.
In: 35. Verformungskundliches Kolloquium, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben. S. 147-152, 2016
209. KUNIN, T.: The Construction of a New Type of Attitude Measure.
Personnel Psychology 8, 65-78 (1955)
210. KRAUSS, L.: HoloLens bei Audi: Digitalisierung in der Mitarbeiter-Qualifizierung.
<https://www.immersivelearning.news/2019/02/12/hololens-bei-audi-digitalisierung-in-der-mitarbeiter-qualifizierung/>, 2019

211. KUSSEROW, H.: Verfahren zur Bewertung von Zwangshaltungen und Tätigkeiten mit Erhöhter Kraftanstrengung und/oder Kraftereinwirkung.
In: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (Hrsg.): BGIA-Report 4/2005: Fachgespräch Ergonomie 2004. Sankt Augustin, 2005
212. LANDAU, K. und G. PRESSEL: Medizinisches Lexikon der beruflichen Belastungen und Gefährdungen, Gentner, Stuttgart, 2009
213. LANGE, J.; IWANITZ, F. and T.J. BURKE: OPC: From Data Access to Unified Architecture. VDE, Offenbach a.M., 2010
214. LÄNGER, K.: Was ist Virtual, Augmented und Mixed Reality? <https://www.it-business.de/was-ist-virtual-augmented-und-mixed-reality-a-650442/>, 2017
215. LAPRÉ, M.A.; MUKHERJEE, A.S. and L.N. VAN WASSENHOVE: Behind the Learning Curve: Linking Learning Activities to Waste Reduction.
Management Science 46(5), 597-611 (2000)
216. LANGLOTZ, T.; MOOSLECHNER, S.; ZOLLMANN, S.; DEGENDORFER, C.; REITMAYR, G. and D. SCHMALSTIEG: Sketching Up the World: In-situ Authoring for Mobile Augmented Reality.
Personal and Ubiquitous Computing 16(6), 623-630 (2012)
217. LAURIG, W.: Elektromyographie als arbeitswissenschaftliche Untersuchungsmethode zur Beurteilung von statischer Muskelarbeit. Beuth-Verlag, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 1970
218. LAURIG, W.: Grundzüge der Ergonomie: Erkenntnisse und Prinzipien. Beuth-Verlag, Berlin, 1992
219. LEE, E.A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges.
In: Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing. pp. 363-369, IEEE, New York, 2008
220. LEE, S. and Ö. AKIN: Augmented Reality-based Computational Fieldwork Support for Equipment Operations and Maintenance.
Automation in Construction 20(4), 338-352 (2011)
221. LEE, J.; LAPIRA, E.; BAGHERI, B. and H. KAO: Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment.
Manufacturing Letters 1(1), 38-41 (2013)
222. LEE, J.; BAGHERI, B. and H.A. KAO: A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems.
Manufacturing Letters 3, 18-23 (2015)
223. LEWIS, J. and M. NEIDER: Through the Google Glass: The Impact of Heads-up-Display on Visual Attention.
Cognitive Research: Principles and Implications 1(13), 1-13 (2016).
224. LIKERT, R.: A Technique for the measurement of attitudes.
Archives of Psychology 140, 44-53 (1932)
225. LIM, A.K.; RYU, J.; YOON, H.M.; YANG, H.C. and S.-k. KIM: Ergonomic Effects of Medical Augmented Reality Glasses in Video-Assisted Surgery.
Surgical Endoscopy 36, 988-998 (2022)
226. LIN, C.; ANDERSEN, D.; POPESCU, V.; ROJAS-MUÑOZ, E.; CABRERA, M.E.; MULLIS, B.; ZARZAUR, B.; ANDERSON, K.; MARLEY, S. and J. WACHS: A First-Person Mentee Second-Person Mentor AR Interface for Surgical Telementoring.

- In: 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). pp. 3-8, 2018
227. LIU, Y.; PENG, Y.; WANG, B.; YAO, S. and Z. LIU (2017). Review on Cyber-Physical Systems.
IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica 4(1), 27-40 (2017)
228. LOCKE, E.A. and G.P. LATHAM: Building a Practically Useful Theory of Goal Setting and Task Motivation.
American Psychologist 57, 705-717 (2002)
229. LOCH, F.; QUINT, F. and I. BRISHTEL: Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly.
In: 12th International Conference on Intelligent Environments (IE). pp. 147-150, 2016
230. LUCZAK, H.: Psychophysiologische Methoden zur Erfassung psychophysischer Beanspruchungszustände.
In: KLEINBECK, U. und J. RUTHENFRANZ (Hrsg.): Enzyklopädie der Psychologie D-III-1. Hogrefe, Göttingen/Toronto, 1987
231. LUCZAK, H. und W. VOLPERT: Arbeitswissenschaft. Kerndefinition – Gegenstandskatalog – Forschungsgebiete. RKW-Verlag, Eschborn, 1987
232. LUDWIG, T.; KOTTHAUS, C.; STEIN, M., DURT, H.; KURZ, C.; WENZ, J.; DOUBLET, T.; BECKER, M.; PIPEK, V. und V. WULF: Arbeiten im Mittelstand 4.0 – KMU im Spannungsfeld des digitalen Wandels.
HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 53(1), 1-16 (2016)
233. LÜPSEN, H.: Multiple Mittelwertvergleiche – parametrisch und nichtparametrisch – sowie α -Adjustierungen mit praktischen Anwendungen mit R und SPSS. Universität zu Köln, Köln, 2014
234. LYNCH, M.: Scientific Practice and Ordinary Action: Ethnomethodology and Social Studies of Science. Cambridge University Press, Cambridge, 1997
235. MACINTYRE, B.; GANDY, M.; DOW, S. and J.D. BOLTER: DART: A Toolkit for Rapid Design Exploration of Augmented Reality Experiences.
ACM Transactions on Graphics 24(3), 932 (2005)
236. MAINWARING, S.D. and C.P. LEE: Turnover and the Model of Coordinated Action (MoCA).
In: Companion of the 2017 ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work and Social Computing (CSCW). pp. 239-242, ACM, New York, 2017
237. MANYIKA, J.; CHUI, M.; BISSON, P.; WOETZEL, J.; DOBBS, R.; BUGHIN, J. and D. AHRON: The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. McKinsey Global Institute, Washington D.C., 2015
238. MANZEY, D.: Psychophysiologie mentaler Beanspruchung.
In: RÖSLER, F. (Hrsg.): Ergebnisse und Anwendungen der Psychophysiologie. S. 799-864, Hogrefe, Göttingen, (1998)
239. MARQUES, B.; SILVA, S.; ALVES, J.; ROCHA, A.; DIAS, P. and B.S. SANTOS: Remote Collaboration in Maintenance Contexts Using Augmented Reality: Insights from a Participatory Process.
International Journal on Interactive Design and Manufacturing 16, 419-438 (2022)

240. MARRAS, W. and S. LAVENDER: The Effects of Method of Use, Tool Design, and Roof Height on Trunk Muscle Activities During Underground Scaling Bar Use. *Ergonomics* 34(2), 221-232 (1991)
241. MARSEU, E.; KOLBERG, D.; BIRTEL, M. and D. ZÜHLKE: Interdisciplinary Engineering Methodology for Changeable Cyber-Physical Production Systems. *IFAC-PapersOnLine* 49(31), 85-90 (2016)
242. MARTIN, H.: Grundlagen der menschengerechten Arbeitsgestaltung. Bund-Verlag, Köln, 1994
243. MARTIN, D.; ROUNCFIELD, M. and I. SOMMERVILLE: Applying Patterns of Cooperative Interaction to Work (Re-)Design: E-Government and Planning. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human factors in Computing Systems. pp. 235-242, ACM, New York, 2002
244. MATTHEW, C.T. and R.J. STERNBERG: Developing Experience-based (Tacit) Knowledge Through Reflection. *Learning and Individual Differences* 19(4), 530-540 (2009)
245. MCCARNEY, R.; WARNER, J.; ILIFFE, S.; VAN HASELEN, R.; GRIFFIN, M. and P. FISHER: The Hawthorne Effect: A Randomised, Controlled Trial. *BMC Medical Research Methodology* 7(30), 1-8 (2007)
246. MENGIS, J. and M.J. EPPLER: Visualizing Instead of Overloading: Exploring the Promise and Problems of Visual Communication to Reduce Information Overload. In: STROTHER, J.B.; ULIJN, J.M. and Z. FAZAL (eds.): Information Overload. pp. 203-229, John Wiley & Sons, Hoboken, 2012
247. MEYER-WAARDEN, K.: Einführung in die biologische und medizinische Meßtechnik. Schattauer Verlag, Stuttgart/New York, 1975
248. MICHAEL, R.: The Strain Index Job Analysis Method: Q & A. <https://ergoweb.com/the-strain-index-job-analysis-method-q-a/>, 2002
249. MICHAS, I.C. and D.C. BERRY: Learning a Procedural Task: Effectiveness of Multimedia Presentations. *Applied Cognitive Psychology* 14(6), 555-575 (2000)
250. MILGRAM, P.; TAKEMURA, H.; UTSUMI, A. and F. KISHINO: Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. In: Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers 2351 – Telemanipulator and Telepresence Technologies, 1995
251. MILLER, G.A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information. *Psychological Review* 63(2), 81-97 (1956)
252. MIRKA, G.: The Quantification of EMG Normalization Error. *Ergonomics* 34(3), 343-352 (1991)
253. MOHR, P.; KERBL, B.; DONOSER, M.; SCHMALSTIEG, D. and D. KALKOFEN: Retargeting Technical Documentation to Augmented Reality. In: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 3337-3346, Association for Computing Machinery, New York (2015)
254. MONK, A.; WRIGHT, P.; HABER, J. and L. DAVENPORT: Cooperative Evaluation: A Run-Time Guide. In Improving your Human-Computer Interface: A Practical Technique. Prentice-Hall, New York, 1993

255. MONOSTORI, L.: Cyber-Physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges.
Procedia CIRP 17, 9-13 (2014)
256. MONOSTORI, L.; KÁDÁR, B.; BAUERNHANSL, T.; KONDOH, S.; KUMARA, S.; REINHART, G.; SAUER, O.; SCHUH, G.; SIHN, W. and K. UEDA: Cyber-Physical Systems in Manufacturing.
CIRP Annals – Manufacturing Technology 65(2), 621-641 (2016)
257. MÜHLEIB, G.B.: Erfassung einer Schulterfunktionsstörung nach Neck dissection mittels simultaner Schulterhebekraft-Messung und Oberflächenelektromyographie des Musculus trapezius und des Constant-Murley-Scores. Dissertation an der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle(Saale)/Wittenberg, 2003
258. MÜHLENBROCK, I.: Alterns- und altersgerechte Arbeitsgestaltung. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund, 2017
259. MULLER, M.J. and S. KUHN: Participatory Design.
Communications of the ACM 36(6), 24-28 (1993)
260. NAVAS, B.J.: Software-Ergonomie. Grundlagen der optimalen Ausgestaltung von Computersystemen für die Benutzer. GRIN Verlag, München, 2015
261. NEBELING, M. and K. MADIER: 360proto.
In: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 1-13, 2019
262. NEBELING, M. and SPEICHER, M.: The Trouble with Augmented Reality/Virtual Reality.
In: 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). pp. 333-337, 2018
263. NERDINGER, F.W.; BLICKLE, G. und N. SCHAPER: Arbeits- und Organisationspsychologie. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2008
264. NEWELL, F.N.; ERNST, M.O.; TJAN, B.S. and H.H. BÜLTHOFF: Viewpoint Dependence in Visual and Haptic Object Recognition.
Psychological Science 12(1), 37-42 (2001)
265. NEYMAN, J. and E.S. PEARSON: On the Use and Interpretation of Certain Test Criteria for Purpose of Statistical Inference, Part I.
Biometrika 20A, 175-240 (1928a)
266. NEYMAN, J. and E.S. PEARSON: On the Use and Interpretation of Certain Test Criteria for Purpose of Statistical Inference, Part II.
Biometrika 20A, 263-294 (1928b)
267. NGUYEN, N.Q.; CARDINELL, J.; RAMJIST, J.M.; ANDROUTSOS, D. and V.X.D. YANG: Augmented Reality and Human Factors Regarding the Neurosurgical Operating Room Workflow.
In: KRESS, B.C. and C. PEROZ (eds.): Proceedings of the SPIE “AR VR MR” (Volume 11310) – Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR). pp. 119-125, SPIE, San Francisco, 2020
268. NIELSEN, J. and R. MOLICH: Heuristic Evaluation of User Interfaces.
In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 249-256, ACM, New York, 1990
269. NIELSEN, J.: Usability Engineering. Morgan-Kaufmann, New York, 1993

270. NILSSON, S. and B. JOHANSSON: Acceptance of Augmented Reality Instructions in a Real Work Setting.
In: CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. pp. 2025-2032, Association for Computing Machinery, New York, 2008
271. N.N.: ERGONOMIC ASSESSMENT WORKSHEET. <https://www.eaws.it/>, o.J.a
272. N.N.: Gefährdungsbeurteilungen mit den Leitmerkmalmethoden. Formblätter.
https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/Leitmerkmalmethode_node.html, o.J.b
273. N.N.: Taqtile: Eine Fallstudie zu Unity für die Fertigung. <https://unity.com/de/case-study/taqtile-augmented-reality-training>, o.J.c
274. N.N.: TeleMyo 2400T G2 Receiver. User Manual. NORAXON U.S.A. INC., Scottsdale, o.J.d
275. N.N.: Einstufungshilfe zum Screening-Verfahren „Bewertung körperlicher Belastungen“, Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt. o.A., s.l., 2007
276. N.N.: Einstufungshilfe zum Screening-Verfahren European Assembly Work-Sheet (EAWS). Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt und Deutsche MTM-Vereinigung e.V. o.A., s.l., 2009
277. N.N.: KoBRA – Kooperationsprogramm zu normativem Management von Belastungen und Risiken körperlicher Arbeit. Ergonomie in der Industrie – aber wie?
In: Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt (Hrsg.): Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements. Berlin, 2010
278. N.N.: Bauanleitungen für 31042, Super Soarer, LEGO® Creator.
<https://www.lego.com/biassets/bi/6145954.pdf>, 2015
279. N.N.: HoloLens-Hardware (1. Generation). <https://www.codecentric.de/wissens-hub/blog/augmented-reality-mit-der-hololens-wie-funktioniert-das-ueberhaupt>, 2018a
280. N.N.: Tobii Pro Glasses 2. <https://www.tobii.com/products/discontinued/tobii-pro-glasses-2>, 2018b
281. N.N.: VIESSMANN Smart Factory mit VISCOPIC Pins.
<https://www.viscopic.com/viessmann-smart-factory-mit-viscopic-pins/>, 2019a
282. N.N.: Gefährdungsbeurteilung bei physischer Belastung – die neuen Leitmerkmalmethoden (LMM) – Kurzfassung.
In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): baua: Bericht. Druck & Verlag Kettler GmbH, Bönen, 2019b
283. N.N.: Gefährdungsbeurteilung mit den Leitmerkmalmethoden – Formblätter.
https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/Leitmerkmalmethode_node.html, 2019c
284. N.N.: Bitkom Digital Office Index 2020. Bitkom e.V., Berlin, 2020
285. N.N.: Datenbrillen für die Industrie | Die Top 3 im Vergleich.
<https://bitnamic.net/datenbrillen-fuer-die-industrie/>, 2021
286. N.N.: Beweg dich, Deutschland! <https://www.tk.de/resource/blob/2033598/9f2d920e270b7034df3239cbf1c2a1eb/beweg-dich-deutschland-data.pdf>, 2022a
287. N.N.: Datenanalyse mit SPSS – Methodenberatung. Universität Zürich,
https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss.html, 2022b

288. NOELLE, E.: Umfragen in der Massengesellschaft. Rowohlt, Reinbek, 1963
289. NONAKA, I.: Toward Middle-Up-Down Management: Accelerating Information Creation. *Sloan Management Review* 29(3), 9-18 (1988)
290. NONAKA, I.: The Knowledge-Creating Company. Harvard Business Review Classics, Brighton, 1991
291. NONAKA, I.: A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation. *Organization Science: A Journal of the Institute of Management Sciences* 5(1), 14-37 (1994)
292. NONAKA, I. and H. TAKEUCHI: The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press, New York/Oxford, 1995
293. NONAKA, I. and R. TOYAMA: The Knowledge-Creating Theory Revisited: Knowledge Creation as a Synthesizing Process. *Knowledge Management Research & Practice* 1, 2-10 (2003)
294. NONAKA, I. and G. VON KROGH: Tacit Knowledge and Knowledge Conversion: Controversy and Advancement in Organizational Knowledge Creation Theory. *Organization Science* 20(3), 635-652 (2009)
295. NONAKA, I.; TOYAMA, R. and N. KONNO: SECI, Ba and Leadership: A Unified Model of Dynamic Knowledge Creation. *Long Range Planning* 33(1), 5-34 (2000)
296. NORMAN, D.A.: The Design of Everyday Things. MIT Press, New York/London/Toronto/Sydney/Auckland, 1998
297. NOVICK, D.G. and K. WARD: Why don't People Read the Manual? In: Department of Computer Science of the University of Texas at El Paso (eds.): Departmental Papers – Paper 15. 2006
298. NRC (National Research Council) (eds.): Diet and Health. Implications for Reducing Chronic Disease Risk. National Academy Press, Washington D.C., 1989
299. ODENTHAL, B.; MAYER, M.; KABUß, W.; KAUSCH, B. and C. SCHLICK: Investigation of Error Detection in Assembled Workpieces Using an Augmented Vision System. In: Proceedings of the IEA2009 – 17th World Congress on Ergonomics. pp. 1-9, 2009
300. OEHLER, G.: Verhinderung von Faltenbildung und Einknicken dünnwandiger Rohre beim Biegen. *Werkstatt und Betrieb* 104(4), 271-274 (1971)
301. ONG, S.K.; YUAN, M.L. and A.Y.C. NEE: Augmented Reality Applications in Manufacturing: A Survey. *International Journal of Production Research* 46(10), 2707-2742 (2008)
302. ORIANS, W. und U. REISACH: Wissenstransfer in der Kranken- und Altenpflege: Möglichkeiten und Grenzen der Digitalisierung von Wissen. In: PFANNSTIEL, M.; KRAMMER, S. und W. SWOBODA (Hrsg.): Digitale Transformation von Dienstleistungen im Gesundheitswesen III. S. 33-54, Springer Gabler, Wiesbaden, 2017
303. OTTO, J.; HENNING, S. and O. NIGGEMANN: Why Cyber-Physical Production Systems Need a Descriptive Engineering Approach – A Case Study in Plug & Produce. *Procedia Technology* 15, 295-302 (2014)

304. PAAS, F.; RENKL, A. and J. SWELLER: Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments.
Educational Psychologist 38(1), 1–4 (2003)
305. PACAUX-LEMOINE, M.P.; BERDAL, Q.; ENJALBERT, S. and D. TRENTESAUX: Towards Human-based Industrial Cyber-Physical Systems.
In: Proceedings – 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems. pp. 615-620, 2018
306. PAELKE, V. and C. RÖCKER: User Interfaces for Cyber-Physical Systems: Challenges and Possible Approaches. Springer International Publishing, Cham, 2015
307. PALMITER, S.; ELKERTON, J. and P. BAGGETT: Animated Demonstrations vs Written Instructions for Learning Procedural Tasks: A Preliminary Investigation.
International Journal of Man-Machine Studies 34(5), 687-701 (1991)
308. PARK, M.; SCHMIDT, L.; SCHLICK, C. and H. LUCZAK: Design and Evaluation of an Augmented Reality Welding Helmet.
Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 17(4):317-330 (2007)
309. PATERNÒ, F.: Model-based Tools for Pervasive Usability.
Interacting with Computers 17(3), 291-315 (2005)
310. PATTERSON, R.E.; BLAHA, L.M.; GRINSTEIN, G.G.; LIGGETT, K.K.; KAVENEY, D.E.; SHELDON, K.C.; HAVING, P.R. and J.A. MOORE: A Human Cognition Framework for Information Visualization.
Computer & Graphics 42, 42-58 (2014)
311. PEINL, R.: A Knowledge Sharing Model illustrated with the Software Development Industry.
In: LEHNER, F.; NÖSEKABEL, H. und P. KLEINSCHMIDT (eds.): Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2006. pp. 389-401, GITO-Verlag, Berlin, 2006
312. PFENDLER, C. and C. SCHLICK: A Comparative Study of Mobile Map Displays in a Geographic Orientation Task.
Behaviour & Information Technology 26 (6), 455-463 (2007)
313. PFENDLER, C.; PITRELLA, F.D. und D. WIEGAND: Messung der Beanspruchung bei der Systembewertung. Bericht Nr. 115. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Wachtberg, 1995
314. POLANYI, M.: Sense-Giving and Sense-Reading.
Philosophy 42(162), 301-325 (1967)
315. POLLALIS, C.; FAHNBULLEH, W.; TYNES, J. and O. SHAER: HoloMuse: Enhancing Engagement with Archaeological Artifacts through Gesture-based Interaction with Holograms.
In: Proceedings of the 10th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. pp. 565-570, ACM, New York, 2017
316. PRUITT, J. and J. GRUDIN: Personas: Practice and Theory.
In: DUX '03 – Designing for user experiences. pp. 1-15, 2003
317. RAELIN, J.A.: A Model of Work-based Learning.
Organization Science 8(6), 563-578 (1997)
318. RADKOWSKI, R. and J. INGEBRAND: HoloLens for Assembly Assistance – A Focus Group Report.
In: LACKEY, S. and J. CHEN (eds.): Virtual, Augmented and Mixed Reality – 9th International Conference. Lecture Notes in Computer Science. pp. 274-282, Springer International Publishing, Cham, 2017

319. RANDALL, D.; O'BRIEN, J.; ROUNCFIELD, M. and J.A. HUGHES: Organisational Memory and CSCW: Supporting the 'Mavis Phenomenon'.
In: Proceedings of the 6th Australian Conference on Computer-Human Interaction. pp. 26-33, IEEE, New York, 1996
320. RASH, C.; SUGGS, C.; MORA, J.; VAN DE POL, C.; REYNOLDS, B.S. and J.S. ROWLEY: Visual Issue Survey of AH-64 Apache Aviators. USAARL Report, Alabama, 2002
321. RASMUSSEN, J.: Information Processing and Human-Machine Interaction. An Approach to Cognitive Engineering. Elsevier, New York, 1986
322. RAVEN, M.: Elektromyographische Analyse der Halsmuskulatur bei einer simulierten Heckkollision.
Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015
323. RE, G.M.; OLIVER, J. and M. BORDEGONI: Impact of Monitor-based Augmented Reality for On-Site Industrial Manual Operations.
Cognition, Technology & Work 18, 379-392 (2016)
324. REINHART, G. und M.F. ZÄH: Assistenzsysteme in der Produktion.
wt Werkstattstechnik 104(9), 516 (2014)
325. REJEB, A.; KEOGH, J.G.; LEONG, G.K. and H. TREIBLMAIER: Potentials and Challenges of Augmented Reality Smart Glasses in Logistics and Supply Chain Management: A Systematic Literature Review.
International Journal of Production Research 59(12), 3747-3776 (2021)
326. RIOS, H.; HINCAPIÉ, M.; MERCADO, E. and E.G. MENDÍVIL: Augmented Reality: An Advantageous Option for Complex Training and Maintenance Operations in Aeronautic Related Processes.
In: Virtual and Mixed Reality – New Trends. pp. 87-96, Springer, Berlin/Heidelberg, 2011
327. ROBINSON, M.; KOVALAINEN, M. and E. AURAMAKI: Diary as Dialogue in Papermill Process Control.
Communications of the ACM 43(1), 65 (2000)
328. ROHDE, M.; BRÖDNER, P.; STEVENS, G.; BETZ, M. and V. WULF: Grounded Design: A Praxeological IS Research Perspective.
Journal of Information Technology 32(2), 163-179 (2016)
329. ROHMERT, W.: Statische Haltearbeit des Menschen, Beuth-Vertrieb GmbH, Köln/Frankfurt a.M., 1960
330. ROHMERT, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 38(4), 193-200 (1984)
331. ROHMERT, W. und W. LAURIG: Physische Beanspruchung durch muskuläre Beanspruchung.
In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): Ergonomie. S. 121-143, Hanser Verlag, München/Wien, 1993
332. ROHMERT, W. and H. LUCZAK: Zur ergonomischen Beurteilung informatorischer Arbeit. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie* 31, 209-229 (1973)
333. ROHMERT, W. und J. RUTENFRANZ: Praktische Arbeitsphysiologie. 3. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1983
334. ROHMERT, W.; RUTENFRANZ, J. und H. LUCZAK: Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen.

- Forschungsbericht für den Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung. Der Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung, Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.), Bonn, 1975
335. ROSCOE, A.H.: Physiological Methods.
In: Advisory Group for Aerospace Research and Development (eds.): Assessing Pilot Workload. AGARDograph No. 233. pp. 23-51, 1978
336. ROWELL, L.B.: Human Circulation Regulation During Physical Stress. Oxford University Press, Oxford, 1986
337. RÜDEL, R.: Muskelphysiologie.
In: KEIDEL, W.-D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. S. 1-37, Thieme Verlag, Stuttgart/New York, 1985
338. RÜHMANN, H.: Ergonomische Bewertung und Gestaltung von Produktionsarbeitsplätzen – nur eine Frage der Unternehmenskultur?
Ergonomie aktuell 005, 2-6 (2004)
339. RYLE, G.: Knowing How and Knowing That: The Presidential Address.
Proceedings of the Aristotelian Society 46(1945-1946), 1-16 (1945)
340. RYLE, G.: The Concept of Mind. Routledge, Abingdon/Oxon, 2009
341. RZAYEV, R.; WOZNIAK, P.W.; DINGLER, T. and N. HENZE: Reading on Smart Glasses: The Effect of Text Position, Presentation Type and Walking.
In: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Paper No. 45. pp. 1-9, 2018
342. SACHS, L.: Angewandte Statistik. Planung und Auswertung. Methoden und Modelle. Springer, Berlin/Heidelberg, 1974
343. SACHS, L. und J. HEDDERICH: Angewandte Statistik. Springer, Berlin/Heidelberg, 2009
344. SACKS, H.: Lectures on Conversation. Blackwell Publishers, Cambridge, 1995
345. SALVADOR, T. and M. MATEAS: Introduction to Design Ethnography.
In: Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. pp. 166-167, ACM, New York, 1997
346. SARRIS, V.: Methodologische Grundlagen der Experimentalpsychologie. Band 1: Erkenntnisgewinnung und Methodik der experimentellen Psychologie. Reinhardt, München, 1998
347. SCHATZKI, T.R.: Practice Mind-ed Orders.
In: SCHATZKI, T.R.; CETINA, K.K. and E. VON SAVIGNY (eds.): The Practice Turn in Contemporary Theory. pp. 42-55, Routledge, London/New York, 2001
348. SCHATZKI, T.R.; CETINA, K.K. and E. VON SAVIGNY: The Practice Turn in Contemporary Theory. Routledge, London/New York, 2001
349. SCHAUB, K.: Das „Automotive Assembly Worksheet“ (AAWS).
In: LANDAU, K. (Hrsg.): Montageprozesse gestalten: Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation. S. 91-111, Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2004
350. SCHAUB, K. und GHEZEL-AHMADI, K.: Vom AAWS zum EAWS – ein erweitertes Screening-Verfahren für körperliche Belastungen.
In: Tagungsband des 53. Kongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA). S. 601-604, GfA-Press, Dortmund, 2007

351. SCHAUB, K.; CARAGNANO, G.; BRITZKE, B. and R. BRUDER: The European Assembly Worksheet.
Theoretical Issues in Ergonomics Science 14(6), 1-23 (2012)
352. SCHEUCH, E.K.: Das Interview in der Sozialforschung.
In: KÖNIG, R. (Hrsg.): Handbuch der empirischen Sozialforschung. S. 136-196, Enke, Stuttgart, 1967
353. SCHLICK, C.; BRUDER, R. und H. LUCZAK: Arbeitswissenschaft. Springer, Berlin/Heidelberg/Dordrecht/London/New York, 2010
354. SCHMAUDER, M. und B. SPANNER-ULMER: Ergonomie. Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation. Hanser Verlag, München, 2014
355. SCHMIDT, K.: The Trouble with "Tacit Knowledge".
Computer-Supported Cooperative Work (CSCW) 21(2-3), 163-225 (2012)
356. SCHMIDT, K.: The Concept of 'Practice': What's the Point?
In: ROSSITTO, C.; CIOLFI, L.; MARTIN, D. and B. CONEIN (eds.): Proceedings of the 11th International Conference on the Design of Cooperative Systems. pp. 427-444, Springer International Publishing, Cham, 2014
357. SCHMIDTKE, H.: Die Ermüdung, Symptome-Theorien-Messversuche. Verlag Hans Huber, Bern/Stuttgart, 1965
358. SCHMIDTKE, H.: Ergonomie, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1993
359. SCHNEIDER, J.V.: Entwicklung und Evaluierung von spezifischen Beleuchtungsszenarien und ergonomischen Untersuchungsansätzen zur Optimierung visueller Prüftätigkeiten. Dissertation im Fachbereich Maschinenbau der Universität Siegen, Siegen, 2009
360. SCHNOTZ, W. and BANNERT, M.: Construction and Interference in Learning from Multiple Representation.
Learning and Instruction 13(2), 141-156 (2003)
361. SCHÜTTE, M.: Zusammenstellung von Verfahren zur Ermittlung des subjektiven Beanspruchungserlebens bei informatorischer Belastung.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 40, 83-89 (1986)
362. SEICHTER, H.; LOOSER, J. and M. BILLINGHURST: ComposAR: An Intuitive Tool for Authoring AR Applications.
In: Proceedings – 7th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. pp. 177-178, 2008
363. SENDERSKÁ, K.; MAREŠ, A. and Š. VÁCLAV: Spaghetti Diagram Application for Workers' Movement Analysis.
U.P.B. Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering 79(1), 139-150, 2017
364. SHAH, R. and P.T. WARD: Defining and Developing Measures of Lean Production.
Journal of Operations Management 25(4), 785-805 (2007)
365. SHI, J.; WAN, J.; YAN, H. and H. SUO: A Survey of Cyber-Physical Systems.
In: Proceedings of the Wireless Communications and Signal Processing Conference. IEEE, New York, 2011
366. SHINGO, S.: A Revolution in Manufacturing: The SMED System. CRC Press, Boca Raton, 1985
367. SHU, Q.; TU, Q. and WANG, K.: The Impact of Computer Self-Efficacy and Technology Dependence on Computer-Related Technostress: A Social Cognitive Theory

Perspective.

International Journal of Human-Computer Interaction 27(10), 923-939 (2011)

368. SINGER, R.: Befragung.
In: SCHNAUBER, H. und G. ZERLETT (Hrsg.): Beanspruchungsmethoden. S. 92-99, Verlag TÜV-Rheinland, Köln, 1985
369. SPEIER, C.; VALACICH, J.S. and I. VESSEY: The Effects of Task Interruption and Information Presentation on Individual Decision Making.
In: Proceedings of the 18th International Conference on Information Systems. 21-36, 1997
370. SPEIER, C.; VESSEY, I. and J.S. VALACICH: The Effects of Interruptions, Task Complexity, and Information Presentation on Computer-Supported Decision-Making Performance.
Decision Sciences 34(4), 771-797, 2003
371. SPENDER, J.-C.: Organizational Knowledge, Learning and Memory: Three Concepts in Search of a Theory.
Journal of Organizational Change Management 9(1), 63-78 (1996)
372. STANNEY, K.: Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications. Lawrence Erlbaum, Mahwah, 2002
373. STEIN, M.; CASTELLI, N. and T. JAKOBI: Maintaining User's Agency in IIoT Settings – Supporting the Use of Systems of Systems.
In: Proceedings of the 16th European Conference on Computer-Supported Cooperative Work. The International Venue on Practice-Centred Computing and the Design of Cooperation Technologies - Exploratory Papers, Reports of the European Society for Socially Embedded Technologies. 2018
374. STEINHILBER, B. and M.A. RIEGER: Arbeitsmedizinisch ausgerichtete Normalisierungsverfahren der Oberflächen-Elektromyographie – Ergebnisse einer standardisierten Literaturübersicht.
Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 63(5), 254-259 (2013)
375. STEINHILBER, B., ANDERS, C., JÄGER, M., LÄUBLI, T., LUTTMANN, A., RIEGER, M.A., SCHOLLE, H.C., SCHUMANN, N.P., SEIBT, R., STRASSER, H. und K. KLUTH: S2k-Leitlinie zur Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 67(2), 113-128 (2013)
376. STERN, H. and T. BECKER: Concept and Evaluation of a Method for the Integration of Human Factors into Human-Oriented Work Design in Cyber-Physical Production Systems.
Sustainability 11(16), 4508 (2020)
377. STEVENS, G.; ROHDE, M.; KORN, M. and V. WULF: Grounded Design: A Research Paradigm in Practice-based Computing.
In: WULF, V.; PIPEK, V.; ROHDE, M.; STEVENS, G. and D. RANDALL (eds.): Socio-Informatics: A Practice-based Perspective on the Design and Use of IT Artifacts. pp. 23-46, Oxford University Press, Oxford, 2018
378. STRASSER, H.: Arbeitswissenschaftliche Methoden der Beanspruchungsermittlung. Beanspruchungsprofile unter dem Aspekt der Ausführbarkeit und Erträglichkeit menschlicher Arbeit. Schriftenreihe Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin. Gentner Verlag, Stuttgart, 1982

379. STRASSER, H.: Physiologische Grundlagen zur Beurteilung menschlicher Arbeit – Belastung/Beanspruchung/Dauerleistung/Ermüdung/Streß.
REFA-Nachrichten 39(5), 18-29 (1986)
380. STRASSER, H.: Ergonomie – Arbeitsplatz. Kap. 2.4.2. Grundsätze zur Arbeitsplatzgestaltung.
In: HETTINGER, T. und G. WOBBE (Hrsg.): *Kompendium der Arbeitswissenschaft*. S. 179-191, Kiel-Verlag, Ludwigshafen, 1993
381. STRASSER, H.: Zur Entwicklung der Arbeitsphysiologie und Ergonomie im deutschsprachigen Raum – Aufgaben und Ziele in Lehre und Forschung.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 61(3), 133-159 (2007)
382. STROHBACH, M.; GELLERSEN, H.; KORTUEM, G. and C. KRAY: Cooperative Artefacts: Assessing Real World Situations with Embedded Technology.
In: DAVIES, N.; MYNATT, E.D. and I. SIIO (eds.): *Proceedings of the 6th International Conference on Ubiquitous Computing, Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 3205). pp. 250-267, Springer, Berlin/Heidelberg, 2004
383. STÜDELI, T.P.: Erfassung und Management von tätigkeitsspezifischen visuellen Beschwerden, Dissertation an der ETH Zürich, Zürich, 2005
384. SUN, S.; ZHENG, X.; GONG, B.; GARCIA-PAREDES, J. and J. ORDIERES-MERE: Healthy Operator 4.0: A Human Cyber-Physical System Architecture for Smart Workplaces.
Sensors 20 (2011), 1-21 (2020)
385. SWELLER, J.: Cognitive Load Theory, Learning Difficulty, and Instructional Design.
Learning and Instruction 4(4), 295-312 (1994)
386. SWELLER, J. and G.A. COOPER: The Use of Worked Examples as a Substitute for Problem Solving in Learning Algebra.
Cognition and Instruction 2(1), 59-89 (1985)
387. SWELLER, J.; VAN MERRIËNBOER, J.J.G. and G.W.C. PAAS: Cognitive Architecture and Instructional Design.
Educational Psychology Review 10, 251-296 (1998)
388. TAN, C.; CHEN, W. and M. RAUTERBERG: Experimental Design for Sternocleidomastoid Muscle Stress Measurement.
In: *Proceedings of the 7th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research*. pp. 1-4, ACM, New York, 2010
389. TANG, A.; OWEN, C.; BIOCCHA, F. and W. MOU: Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly.
In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. pp. 73-80, 2003
390. TANG, A.; NEUSTAEDTER, C. and S. GREENBERG: Videoarms: Embodiments for Mixed Presence Groupware.
In: BRYAN-KINNS, N.; BLANFORD, A.; CURZON, P. and L. NIGAY (eds.): *People and Computers XX – Engage*. pp. 85-102, Springer, London, 2007
391. TASSINARY, L.G., CACIOPPO, J.T. and E.J. VANMAN: The Skeletomotor System: Surface Electromyography.
In: CACIOPPO, J.T., TASSINARY, L.G. and G.G. BERNSTON (eds.): *Handbook of Psychophysiology*. pp. 267-303, Cambridge University Press, Cambridge, 2007
392. TEGTMEIER, P. and S. WISCHNIEWSKI: Tablets and Smart Glasses in Modern Production Environments – A Lab Study on Distracted Walking.

- In: KARWOWSKI, W. and T. AHAM (eds.): *Intelligent Human Systems Integration (IHSI)*. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 722, pp. 614-619, Springer International Publishing, Cham, 2018
393. THEIS, S.; PFENDLER, C.; ALEXANDER, T.; MERTENS, A.; BRANDL, C. und C.M. SCHLICK: *Head-Mounted Displays – Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Physische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden, 2016
394. THRAMBOULIDIS, K. and F. CHRISTOULAKIS: *UML4IoT – A UML-based Approach to Exploit IoT in Cyber-Physical Manufacturing Systems*. *Computers in Industry* 82, 259-272 (2016)
395. TUMLER, J.; MECKE, R.; SCHENK, M.; HUCKAUF, A.; DOIL, F.; PAUL, G.; PFISTER, E.A.; BÖCKELMANN, I. and A. ROGGENTIN: *Mobile Augmented Reality in Industrial Applications: Approaches for Solution of User-Related Issues*. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. pp. 87-90, IEEE, Cambridge, 2008
396. ULICH, E.: *Arbeitspsychologie*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2005
397. VALERIUS, K.-P.: *Das Muskelbuch. Anatomie, Untersuchung, Bewegung*. KVM – Der Medizinverlag, Marburg, 2013
398. VAN GOUBERGEN, D. and H. VAN LANDEGHEM: *Rules for Integrating Fast Changeover Capabilities into New Equipment Design*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 18 (3-4), 205-214 (2002)
399. VAN MERRIËNBOER, J.J.G. and J. SWELLER: *Cognitive Load Theory and Association for the Advancement of Computing*. *Education Journal* 17(2), 147-177 (2005)
400. VELDEN, T.: *Explaining Field Differences in Openness and Sharing in Scientific Communities*. In: *Proceedings of the 2013 Conference on Computer Supported Cooperative Work*. pp. 445-458, ACM, New York, 2013
401. WAGNER, R.M.: *Industrie 4.0 für die Praxis*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2018
402. WAKULA, J.; BERG, K.; SCHAUB, K.; BRUDER, R.; GLITSCH, U. und R. ELLEGAST: *Der montagespezifische Kraftatlas*. In: *Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg.): BGIA-Report 3*, Berlin, 2009
403. WANG, Q.; MYERS, M.D. and D. SUNDARAM: *Digital Natives und Digital Immigrants – Entwicklung eines Modells digitaler Gewandtheit*. *Wirtschaftsinformatik* 55(6), 409-420
404. WATSON, S. and K. HEWETT: *A Multi-Theoretical Model of Knowledge Transfer in Organizations: Determinants of Knowledge Contribution and Knowledge Reuse*. *Journal of Management Studies* 43(2), 141-173 (2006)
405. WERRLICH, S.; DANIEL, A.; GINGER, A.; NGUYEN, P.-A. and G. NOTNI: *Comparing HMD-Based and Paper-Based Training*. In: *Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. pp. 134-142, 2018
406. WESTERFIELD, G.; MITROVIC, A. and M. BILLINGHURST: *Intelligent Augmented Reality Training for Motherboard Assembly*. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* 25(1), 157-172 (2015)

407. WICKENS C.D. and A. KRAMER: Engineering Psychology. *Annual Review of Psychology* 36, 307-348 (1985)
408. WILLE, M.: Head-Mounted Displays – Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden, 2016
409. WILLE, M.; GRAUEL, B. und L. ADOLPH: Beanspruchung bei Head-Mounted Displays im Langzeiteinsatz.
In: BRANDENBURG, E.; DORIA, L.; GROSS, A.; GÜNZLER, T. und H. SMIESZEK (Hrsg.): Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion. S. 617-625, 2014
410. WILSCHUT, E.S.; MURPHY, M.S. and T. BOSCH: Evaluating Learning Approaches for Product Assembly: Using Chunking of Instructions, Spatial Augmented Reality and Display based Work Instructions.
In: Proceedings of the 12th ACM International Conference. pp. 376-381, 2019
411. WILSON, T.D.: Information Overload: Implications for Healthcare Services. *Health Informatics Journal* 7, 112-117 (2001)
412. WITTGENSTEIN, L.: Philosophical Investigations. Blackwell, London, 1953
413. WOLF, W.: Cyber-Physical Systems. *Computers* 42(3), 88-89 (2009)
414. WOMACK, J.P.; JONES, D.T. and D. ROOS: The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production. Westview Press, Boulder, 1990
415. WRIGHT, S.P.: Adjusted p-Values for Simultaneous Inference. *Biometrics* 48, 1005-1013 (1992)
416. WULF, V.; MÜLLER, C.; PIPEK, V.; RANDALL, D.; ROHDE, M. and G. STEVENS: Practice-based Computing: Empirically Grounded Conceptualizations Derived from Design Case Studies.
In: WULF, V.; SCHMIDT, K. and D. RANDALL (eds.): Designing Socially Embedded Technologies in the Real-World. pp 111-150, Springer, London, 2015
417. WULF, V.; PIPEK, V.; RANDALL, D.; ROHDE, M.; SCHMIDT, K. and G. STEVENS: Socio-Informatics. Oxford University Press, Oxford. 2018
418. YUEN, S.C.-Y.; YAOYUNYONG, G. and E. JOHNSON: Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange* 4(1), 119-140 (2011)
419. ZAUNER, J.; HALLER, M.; BRANDL, A. and W. HARTMANN: Authoring of a Mixed Reality Furniture Assembly Instructor for Hierarchical Structures.
In: Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. pp. 237-246, 2003
420. ZIDEK, K.; PITEL, J.; ADAMEK, M.; LAZORIK, P. and A. HOSOVSKY: Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept. *Sustainability* 12(9), 3658 (2020)
421. ZIJESTRA, F.R.: Efficiency in Work Behavior. A Design Approach for Modern Tools. Delft University Press, Delft, 1993
422. ZIPP, P.: Optimierung der Oberflächenableitung bioelektrischer Signale. Fortschrittbericht VDI Reihe 17 Nr. 45, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988

Normen und Richtlinien

423. BGHM-FI Nr. 0065: FAQ-Liste zum Einsatz von Datenbrillen an (gewerblichen) Arbeitsplätzen in Holz- und Metallbranchen. Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM), Mainz, 2019
424. BGI/GUV-I 7011: Belastungen für Rücken und Gelenke – was geht mich das an? Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin, 2013
425. DGUV Information 215-410: Bildschirm- und Büroarbeitsplätze. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin, 2019
426. DGUV Information 215-450: Softwareergonomie. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin, 2021
427. DGUV Information 240-460 (bisher: BGI 504-46): Handlungsanleitung für die arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Grundsatz G46 „Belastungen des Muskel- und Skelettsystems einschließlich Vibrationen“. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin, 2009
428. DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2003
429. DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2003
430. DIN 8586: Fertigungsverfahren Biegeumformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2003
431. DIN 33402: Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2020
432. DIN 33411: Körperkräfte des Menschen – Teil 1: Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 1982
433. DIN EN 166: Persönlicher Augenschutz – Anforderungen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2002
434. DIN EN 614: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2009
435. DIN EN 894: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 2: Anzeigen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2008
436. DIN EN 1005: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 1: Begriffe. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2009
437. DIN EN 1005: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 3: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2008
438. DIN EN 1005: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 5: Risikobeurteilung für kurzzyklische Tätigkeiten bei hohen Handhabungsfrequenzen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2007
439. DIN EN ISO 4762: Zylinderschrauben mit Innensechskant. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2004

440. DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Interaktionsprinzipien. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2020
441. DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2017
442. DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 125: Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2017
443. DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2020
444. DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 303: Anforderungen an elektronische optische Anzeigen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2011
445. DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 307: Analyse- und Konformitätsverfahren für elektronische Anzeigen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2008
446. DIN EN ISO 10075: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2017
447. DIN EN ISO 10075: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 3: Grundsätze und Anforderungen an Verfahren zur Messung und Erfassung psychischer Arbeitsbelastung. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2004
448. ISO 11226: Ergonomie – Evaluierung von Körperhaltungen bei der Arbeit. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2000
449. ISO 11228: Ergonomie – Manuelles Handhaben von Lasten – Teil 1: Heben und Tragen. Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2003
450. ISO 11228: Ergonomie – Manuelles Handhaben von Lasten – Teil 2: Ziehen und Schieben. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2007
451. ISO 11228: Ergonomie – Manuelles Handhaben von Lasten – Teil 3: Handhabung geringer Lasten bei hohen Bewegungsfrequenzen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2007
452. Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Maschinenrichtlinie)
453. Richtlinie 89/391/EWG des Rates vom 12. Juni 1989 über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit (Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie)
454. VDI 3430: Rotationszugbiegen von Profilen. Beuth, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2014

Rechtsvorschriften

455. Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.4 „Beleuchtung“ zu §3a Absatz , insbesondere im Punkt 3.4 Absatz 1 und 2 sowie Punkt 3.5 Absatz 2 des Anhanges der Arbeitsstättenverordnung. Beuth-Verlag, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2011
456. Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.5 „Raumtemperatur“ zu § 3 Absatz 1 sowie insbesondere im Punkt 3.5 des Anhanges der Arbeitsstättenverordnung. Beuth-Verlag, Berlin/Köln/Frankfurt a.M., 2010
457. Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit

- (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) vom 07. August 1996, zuletzt geändert durch Artikel 12 des Gesetzes vom 22. November 2021. BGBl. I, S. 4906, 4913
458. Gesetz zur Stärkung der Teilhabe und Selbstbestimmung von Menschen mit Behinderungen (Bundesteilhabegesetz – BTHG) vom 23. Dezember 2016, zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes vom 2. Juni 2021. BGBl. I, S. 1387, 1396
459. Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) (9. ProdSV) vom 12. Mai 1993, zuletzt geändert durch Artikel 23 des Gesetzes vom 27. Juli 2021. BGBl. I, S. 3146
460. Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) 1151: Gefährdungen an der Schnittstelle Mensch-Arbeitsmittel – Ergonomische und menschliche Faktoren, Arbeitssystem. In: Bundesministerium des Inneren (*Hrsg.*): Gemeinsames Ministerialblatt (GMBI) 66(17-18), 340-362, 2015
461. Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordnung – DSGVO)
462. Verordnung über Arbeitsstätten (ArbStättV) vom 12. August 2004, zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. Dezember 2020, BGBl. I, S. 3334
463. Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (BildscharbV) vom 4. Dezember 1996, außer Kraft getreten zum 3. Dezember 2016
464. Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit (Lastenhandhabungsverordnung – LasthandhabV) vom 4. Dezember 1996, zuletzt geändert durch Artikel 294 der Verordnung vom 19. Juni 2020, BGBl. I, S. 1328
465. Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) vom 3. Februar 2015, zuletzt geändert durch Artikel 7 der Verordnung vom 27. Juli 2021, BGBl. I, S. 3146

Auszüge dieser Arbeit können auch den nachfolgend aufgeführten Veröffentlichungen entnommen werden:

466. ABELE, N.D.: Cyber-physische Unterstützung des Menschen am Beispiel betrieblicher Rüstprozesse.
In: KLUßMANN, A. und B. HARTMANN (*Hrsg.*): Kurzfassungen der Vorträge des 21. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler des Forum Arbeitsphysiologie der DGAUM und GfA, 2017
467. ABELE, N.D.: Cyber-physische Rüstunterstützung – Evaluierung physischer und kognitiver Beanspruchung des Menschen bei der Nutzung eines Head-Mounted Display.
In: STEINHILBER, B.; RIEGER, M.A. und R. WALL (*Hrsg.*): Kurzfassungen der Vorträge des 22. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler des Forum Arbeitsphysiologie der DGAUM und GfA, 2018
468. ABELE, N.D.: Evaluierung der muskulären Beanspruchung und Komfortbewertung beim Einsatz eines Head-Mounted Display.
In: Deutscher Betriebsärzte-Kongress 2018 bzw. 34. Arbeitsmedizinische

- Jahrestagung des VDBW, Sonderpublikation von VDBW und ASU. S. 31-32, Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG, Stuttgart, 2018
469. ABELE, N.D.: Cyber-physische Rüstunterstützung – Ergonomische Untersuchung zur Evaluierung physischer und kognitiver Beanspruchung des Menschen bei der Nutzung eines Head-Mounted Display (HMD).
In: Proceedings des 65. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. D.1.1, GfA-Press, Dortmund, 2019
470. ABELE, N.D.: Muskuläre und mentale Beanspruchung sowie Komfortbedingungen bei der Nutzung eines Head-Mounted Display.
In: LANG, J. und S. SCHMITZ-SPANKE (Hrsg.): 59. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V., Kongressdokumentation. S. 55, 2019
471. ABELE, N.D. und K. KLUTH: Beanspruchungsbezogene Evaluierung AR-basierter versus papierunterstützter Rüstinstruktionen zur Einrichtung von Industriemaschinen.
In: Proceedings des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. B.2.1, GfA-Press, Dortmund, 2020
472. ABELE, N.D. und K. KLUTH: Interaktions-ergonomische Gestaltung und Kompatibilität von AR-unterstützten Informationsdarstellungen am Beispiel eines Head-Mounted Displays für industrielle Rüstvorgänge.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (2021)
473. ABELE, N.D. und K. KLUTH: Subjektives Beanspruchungserleben während der Nutzung eines AR-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems im Zuge industrieller Rüstvorgänge.
In: Proceedings des 67. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. B.5.1, GfA-Press, Dortmund, 2021
474. ABELE, N.D. and K. KLUTH: Strain-Related Evaluation of an AR-based Cyber-Physical Production System for Setting Up Industrial Machines.
In: BLACK, N.; NEUMANN, P. and I. NOY (eds.): Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 221, pp. 355-362, Springer International Publishing, Cham, 2021
475. ABELE, N.D.; GRIFFEL, C.; PENZKOFER, M. und K. KLUTH: Ergonomische Untersuchungen eines Head-Mounted Display zur Beurteilung der Anforderungen an eine physiologisch optimale Implementierung im betrieblichen Rüstprozess.
In: Proceedings des 64. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. D.1.1. GfA-Press, Dortmund, 2018
476. ABELE, N.D., HOFFMANN, S., DE CARVALHO, A.F.P., SCHWEITZER, M., WULF, V. und K. KLUTH: Design eines praxisorientierten und wissensbasierten Cyber-Physischen Systems für industrielle Rüstvorgänge.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (2021)
477. ABELE, N.D., HOFFMANN, S., DE CARVALHO, A.F.P., SCHWEITZER, M., WULF, V. and K. KLUTH: Development and Evaluation of a Knowledge-based Cyber-Physical Production System to Support Industrial Set-up Processes Considering Ergonomic and User-centered Aspects.
In: DUFFY, V.G. (eds.): Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. HCII 2023. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 14028, pp. 317-329, Springer, Cham, 2023
478. ABELE, N.D., HOFFMANN, S., DE CARVALHO, A.F.P., SCHWEITZER, M., WULF, V. and K. KLUTH: Knowledge and Expertise Sharing – Designing an AR-mediated Cyber-

Physical Production System for Industrial Set-up Processes.
 In: Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation (Website),
https://workjournal.org/sites/default/files/inline-files/Nils-Abele--IEA-2021_ePoster_Abele-Nils-Darwin.pdf, 2021

479. ABELE, N.D.; HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; SCHWEITZER, M.; WULF, V. and K. KLUTH: Knowledge and Expertise Sharing – Designing an AR-mediated Cyber-Physical Production System for Industrial Set-up Processes.
 In: BLACK, N.; NEUMANN, P. and I. NOY (eds.): Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 221, pp. 347-354, Springer International Publishing, Cham, 2021
480. ABELE, N.D.; HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; SCHWEITZER, M.; WULF, V. und K. KLUTH: Wissensarchivierung und -transfer im Rahmen betrieblicher Rüstvorgänge – Design eines AR-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems.
 In: Proceedings des 67. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. B.5.2, GfA-Press, Dortmund, 2021
481. ABELE, N.D.; HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; SCHWEITZER, M.; WULF, V. und K. KLUTH: Entwicklung eines Cyber-Physischen Produktionssystems auf Grundlage qualitativer Feldforschung unter Anwendung des Grounded Design.
 In: Proceedings des 68. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. B.10.1, GfA-Press, Dortmund, 2022
482. ABELE, N.D.; HOFFMANN, S.; KUHNHEN, C.; LUDWIG, T.; SCHÄFER, W.; SCHWEITZER, M. and V. WULF: Supporting the Set-up Processes by Cyber Elements based on the Example of Tube Bending.
 In: MAYR, H.C. and M. PINZGER (eds.) Informatik 2016 – Informatik von Menschen für Menschen. pp. 1627-1637, GI-Edition-Lecture Notes in Informatics, Bonn, 2016
483. ABELE, N.D.; HOFFMANN, S.; KUHNHEN, C.; LUDWIG, T.; SCHÄFER, W.; SCHULTE, L.; SCHWEITZER, M. und V. WULF: Unterstützung des Rüstprozesses durch cyber-physische Hilfsmittel am Beispiel des Rohrbiegeprozesses.
 In: Zukunftsprojekt Arbeitswelt 4.0, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau in Kooperation mit den Forschungsinstituten IAW, ZEW, IAO, ISI und Universität Hohenheim, Konferenzdokumentation. C1, 2016
484. DE CARVALHO, A.F.P.; HOFFMANN, S.; ABELE, N.D.; SCHWEITZER, M. and V. WULF: Designing Cyber-Physical Production Systems for Industrial Set-Up: A Practice-Centred Approach.
 In: ARDITO, C.; LANZILOTTI, R.; MALIZIA, A.; PETRIE, H.; PICCINNO, A.; DESOLDA, G. and K. INKPEN: Human-Computer Interaction – INTERACT 2021. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12932. pp. 678-701, Springer, Cham, 2021
485. DE CARVALHO, A.F.P.; HOFFMANN, S.; ABELE, N.D.; SCHWEITZER, M.; TOLMIE, P.; RANDALL, D. and V. WULF: Of Embodied Action and Sensors. Knowledge and Expertise Sharing in Industrial Set-Up.
Computer-Supported Cooperative Work 27(3-6), 875-916 (2018)
486. HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P. and N.D. ABELE: Uncovering the Potential of Augmented Reality Glasses for Industrial Set-Up.
 In: The International Venue on Practice-centered Computing and the Design of Cooperation Technologies – Exploratory Papers, Reports of the European Society for Socially Embedded Technologies. Proceedings of the 16th European Conference on Computer-Supported Cooperative Work. 2018

487. HOFFMANN, S.; ABELE, N.D. und A.F.P. DE CARVALHO: Herausforderungen des Wissensmanagements im Rahmen betrieblicher Rüstprozesse.
In: SURE-VETTER, Y.; ZANDER, S. und A. HARTH (Hrsg.): Tagungsband der 9. Konferenz Professionelles Wissensmanagement (Professional Knowledge Management). S. 109, 2017
488. HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; ABELE, N.D. and M. SCHWEITZER: Supporting Knowledge and Expertise Sharing for Industrial Set-up through Cyber-Physical Systems.
In: POMS 2018 – 29th Annual Conference, List of Tracks and Abstracts. p. 126, 2018
489. HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; ABELE, N.D.; SCHWEITZER, M.; TOLMIE, P. and V. WULF: Cyber-Physical Systems for Knowledge and Expertise Sharing in Manufacturing Contexts: Towards a Model Enabling Design.
Computer-Supported Cooperative Work 28, 469-509 (2019)
490. HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; SCHWEITZER, M.; ABELE, N.D. and V. WULF: Producing and Consuming Instructional Material in Manufacturing Contexts: Evaluation of an AR-based Cyber-Physical Production System for Supporting Knowledge and Expertise Sharing.
In: Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction. Vol. 6. pp. 366:1-366:36, 2022
491. KROMER, N.; ABELE, N.D.; SCHWEITZER, M. und K. KLUTH: Kognitive Auswirkungen bei der Nutzung eines IoT-Tools im Rahmen eines betrieblichen Rüstprozesses.
In: BÖCKELMANN, I.; DARIUS, S. und A. MINOW (Hrsg.): Kurzfassungen der Vorträge des 23. Symposiums Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler des Forums Arbeitsphysiologie der DGAUM und GfA, 2019
492. KUHNHEN, C.; SCHULTE, L.; ABELE, N.D.; ENGEL, B.; SCHWEITZER, M.; HOFFMANN, S.; WULF, V.; SCKUDLAREK, J.S.; SELTER, O.; HUPERTZ, M. und S. THILO: Das qualifizierte Erfahrungswissen der Maschinenbediener wird festgehalten.
Blechnet – Das Branchen-Magazin (5), 24-25 (2016)
493. PAUL, G.; ABELE, N.D. and K. KLUTH: A Review and Qualitative Meta-Analysis of Digital Human Modelling and Cyber-Physical-Systems in Ergonomics 4.0.
IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors (2021)
494. SCHULTE, L.; KUHNHEN, C.; ABELE, N.D.; HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; ENGEL, B.; SCHWEITZER, M. und V. WULF: Cyberrüsten 4.0 – Erfahrungswissensorientierte Einstellvorschrift für einen Rotationszugbiegeprozess.
In: Tagungsband des 36. Verformungskundlichem Kolloquium (Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben). S. 140-145, 2017
495. SCHULTE, L.; KUHNHEN, C.; ABELE, N.D.; HOFFMANN, S.; DE CARVALHO, A.F.P.; ENGEL, B.; SCHWEITZER, M. and V. WULF: Cyber Equipping 4.0 – FE-Simulation-based Setting Instructions for a Rotary Draw-Bending Machine.
In: XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamental and Applications. pp. 754-765, 2017

12 Anhang

Anhang A – Versuchsdesign

<i>Einwilligungserklärung zur Erhebung und Verarbeitung personenbezogener Daten im Rahmen des Forschungsprojektes „Cyberrüsten 4.0“</i>	A1-A2
<i>Interview-Leitfaden zur empirischen Datenerhebung</i>	A3-A5
<i>Code-Übersicht im Zuge der Datenanalyse</i>	A6-A8
<i>Interview-Leitfaden zur Evaluierung des Prototyps</i>	A9
<i>Papierbasierte und örtlich gebundene Rüstanleitung</i>	A10-A15

Anhang B – Auswertung objektiver Messdaten

<i>Matlab-Skript zur Berechnung der muskelspezifischen Ruheaktivität</i>	B1
<i>Matlab-Skript zur Berechnung der muskelspezifischen Maximalaktivität</i>	B2-B3
<i>Matlab-Skript zur Berechnung der normierten muskelspezifischen Aktivität</i>	B4-B6

Anhang C – Fragebögen der Teilstudien

<i>Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie 1, „HoloErgo“)</i>	C1-C20
<i>Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie 2, „HoloErgo 2.0“)</i>	C21-C43

Anhang D – Statistische Verteilungstabellen und kritische Werte

<i>Auszug der t-Verteilung zur statistischen Sicherheit 1-α in Abhängigkeit der verschiedenen Signifikanzniveaus und Freiheitsgrade (SACHS, 1974)</i>	D1
<i>Auszug der Tabelle der kritischen Werte für den Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (CLAUS & EBNER, 1972)</i>	D2
<i>Auszug der Standardnormalverteilung (z-Verteilung) mitsamt der gelb markierten Konfidenzniveaus (FISHER & YATES, 1974)</i>	D3

Anhang E – Ergebnisse der Aufgabenmodellierung und der Arbeitsplatzbewertungsverfahren

<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Arbeitsauftrag</i>	E1
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Rüstprozess</i>	E1
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Nicht-mechanisches Rüsten</i>	E1
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Rüstvorbereitung</i>	E1
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Logistik</i>	E1
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Werkzeug-Transport</i>	E2
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Mechanisches Rüsten</i>	E2

Anhang E (Fortsetzung)

<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Umrüsten der Werkzeugsegmente</i>	<i>E2</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Rüsten der Werkzeuge.....</i>	<i>E2</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Abrüsten</i>	<i>E2</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Aufrüsten.....</i>	<i>E3</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Dynamisches Rüsten</i>	<i>E3</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Änderungen im Maschinenprogramm</i>	<i>E3</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Festlegung der werkzeugspezifischen Anpassungen</i>	<i>E3</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Einstellung der Maschinenachsen</i>	<i>E4</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Schmiermitteleinsatz</i>	<i>E4</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Änderung der Faltenglätterposition.....</i>	<i>E4</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Werkzeugwechsel.....</i>	<i>E4</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Herstellungsprozess.....</i>	<i>E4</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Prüfprozess</i>	<i>E5</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Optische und haptische Prüfung.....</i>	<i>E5</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Lehrenprüfung</i>	<i>E5</i>
<i>Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation – Taktile Prüfung</i>	<i>E5</i>
<i>LMM zur Beurteilung und Gestaltung bei manuellen Arbeitsprozessen – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion ...</i>	<i>E6-E7</i>
<i>LMM zur Beurteilung und Gestaltung bei manuellen Arbeitsprozessen – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens.....</i>	<i>E8-E9</i>
<i>EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion.....</i>	<i>E10-E13</i>
<i>EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens</i>	<i>E14-E17</i>



Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Kuhnhen
Projektleiter & Verbundkoordinator
 Lehrstuhl für Umformtechnik
 Paul-Bonatz-Str. 9-11, PB-A 336
 57076 Siegen
 Telefon: +49 271 740-2756
 Mail:
 christopher.kuhnhen@uni-siegen.de

M.Sc. Nils Darwin Abele
Projektmitarbeiter / Interviewer
 Lehrstuhl für Technologie-
 management
 Unteres Schloß 3, US-A 121
 57072 Siegen
 Telefon: +49 271 740-3142
 Mail: darwin.abele@uni-siegen.de

M.Sc. Sven Hoffmann
Projektmitarbeiter / Interviewer
 Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik &
 Neue Medien
 Kohlbettstr. 15, US-E 117
 57072 Siegen
 Telefon: +49 271 740-2098
 Mail: sven.hoffmann@uni-siegen.de

Einwilligungserklärung zur Erhebung und Verarbeitung personen- bezogener Daten im Rahmen des Forschungsprojekts „Cyberrüsten 4.0“

Das Forschungsprojekt „Cyberrüsten 4.0“ wurde Ihnen vorgestellt. Nähere Informationen zu dem Projekt erhalten Sie unter folgender Webadresse:

<http://www.uni-siegen.de/start/news/oeffentlichkeit/686641.html>

Im Rahmen der geplanten zweieinhalbjährigen Untersuchung, d.h. im Zeitraum von Juli 2016 bis März 2019, werden mit Ihrer Einwilligung sämtliche durchgeführten Interviews per Audiogerät aufgenommen und in Schriftform gebracht. Zusätzlich kann das Arbeitsumfeld mit Bezug zum Projektinteresse, d.h. Gegenstände, Werkzeuge und Unterlagen zum Thema Rüsten sowie deren Standorte durch Bild-, Video- und Tonaufzeichnung, festgehalten werden, um ein besseres Verständnis über den Nutzungskontext zu erhalten. Die Anwendung eines Eye-Tracking Systems (<http://www.tobii.com/product-listing/tobii-pro-glasses-2/>) mit Video- und Tonaufzeichnungen erfolgt freiwillig. Der Träger der Brille gibt in diesem Fall den Bildausschnitt vor, der sich ausschließlich auf den Rüstprozess beschränkt. Dritte, die nicht am Forschungsprojekt beteiligt sind, werden dabei nicht aufgenommen. Die Projektmitarbeiter gewährleisten, dass das aufgezeichnete Material frei von Rechten Dritter ist und keine Betriebsgeheimnisse offenbart werden.

Ihre personenbezogenen Kontaktdaten werden von den Interviewdaten getrennt und nach Beendigung des Forschungsprojektes automatisch gelöscht. Die Daten sind für Dritte unzugänglich.

Die durch die empirische Arbeit erzeugten Angaben und die im Projektkontext erhobenen Daten über das Arbeitsumfeld werden für wissenschaftliche Zwecke anonymisiert gespeichert, im Rahmen der Forschungsarbeit analysiert und für Veröffentlichungen verwendet. Alle Angaben, die zu einer Identifizierung der Person führen könnten, werden verändert oder aus dem Text entfernt. Im Rahmen wissenschaftlicher Veröffentlichungen werden lediglich Ausschnitte des Interviews zitiert. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der entstehende Gesamtzusammenhang von Ereignissen nicht zu einer Personenidentifikation gegenüber Dritten führt.

Die Interview-Teilnahme erfolgt auf freiwilliger Basis. Sie haben zu jeder Zeit eine Widerrufsmöglichkeit hinsichtlich des aktuell geführten Interviews, der Durchführung weiterer Interviews sowie Ihres Einverständnisses für Aufzeichnung und Niederschrift der Befragung. Dadurch entstehen in keinsten Weise Nachteile für Sie. Bitte wenden Sie sich diesbezüglich an den zuständigen Projektleiter Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Kuhnhen.

Die Projektmitarbeiter werden Sie während der Projektdauer möglicherweise mehrfach kontaktieren, um ein Feedback zwecks einer Reflektionsschleife zu erhalten. Weiterhin können Fragen, die im Speziellen die Forschung betreffen, geklärt werden, um somit einen erfolgreichen Studienverlauf gewährleisten zu können.

Die vorstehenden Angaben habe ich gelesen und verstanden. Mit meiner Unterschrift erkläre ich mich für die Erhebung und Verarbeitung meiner Daten (Interview-Inhalte bzw. Bild-, Ton- und Videoaufnahmen) sowie hinsichtlich deren streng vertraulicher Nutzung für wissenschaftliche Zwecke durch das Projektteam einverstanden. Ich stimme der Teilnahme am Forschungsprojekt zu und erkläre mich mit den aufgeführten Bedingungen sowie insbesondere mit den folgenden Erhebungsmethoden einverstanden:

Audioaufzeichnung des Interviews ja nein

Videaufzeichnung des Rüstprozesses ja nein

Anwendung der Eye-Tracking-Brille ja nein

Ort, Datum

Vor- & Nachname

Unterschrift

Wir bedanken uns für Ihre Bereitschaft das Forschungsvorhaben im Rahmen der empirischen Erhebung zu unterstützen.

1. Beschreiben Sie Ihre Rolle und Tätigkeit im Unternehmen.
2. Wie lange nehmen Sie diese Rolle bereits ein?
3. Beschreiben Sie Ihre Qualifikation.
4. Wie gliedert sich der Rüstprozess auf?
5. Was unterstützt Sie während des Rüstprozesses?
6. Was fehlt Ihnen während des Rüstprozesses?
7. Nennen und beschreiben Sie uns „K.O.“-Kriterien des Rüstprozesses. | Wo ist der „Flaschenhals“ des Rüstprozesses?
8. Wie beurteilen Sie das Rüsten gegenüber anderen Tätigkeiten im Betrieb?
 - a. Rüsten Sie gerne? Warum (nicht)?
9. Wie ist die Arbeitsaufteilung rund um die Rüstvorgänge organisiert?
10. Welche Rolle spielen ((un-)freiwillige) Weiterbildungen bzw. Schulungen?
 - a. Wie oft besuchen Sie Seminare, Fortbildungen etc.?
 - b. Schildern Sie uns bitte Ihre Erfahrungen damit.
11. Inwieweit ist das Lernen bzw. die Weiterbildung Teil Ihrer alltäglichen Arbeit?
 - a. Wie oft geschieht dies aus eigenem Antrieb?
 - b. In welchen Situationen werden Sie durch den Arbeitgeber dazu angehalten?
12. Welche Einstellvorgänge sind die wichtigsten?
 - a. In welcher Reihenfolge werden die Werkzeugeinstellungen variiert?
 - b. Welche Maßnahmen ergreifen Sie in Abhängigkeit des jeweiligen Fehlerbildes? Beschreiben Sie Ihre Reaktionen anhand von Beispielen.
 - c. Welche Rüst-Einstellung wird besonders oft variiert?
 - d. Welcher Arbeitsschritt erfordert die Konzentration? Warum?
 - e. Welcher Arbeitsschritt ist am stärksten von der Erfahrung des Einrichters abhängig? Warum?
13. Welche Hilfsmittel sind für den Rüstvorgang zwingend erforderlich?
 - a. Welche Hilfsmittel müssten hinzugezogen werden, um den Rüstprozess zu optimieren? Warum?
 - b. Nennen und beschreiben Sie Hilfsmittel, die Sie selbst geschaffen haben.
14. Welches Werkzeug hat den größten Einfluss auf die Fehlerbilder des Rohrbogens?
 - a. Werkzeuge
 - i. Biegeform
 - ii. Dorn
 - iii. Faltenglätter
 - iv. Gegenhalter
 - v. Rohrvorschub
 - vi. Spannbacken
 - vii. ...
 - b. Fehlerbilder
 - i. Rissbildung
 - ii. Ovalität
 - iii. Falten
 - iv. ...
15. Inwiefern müssen Sie Ihre Vorgehensweise aufgrund von bestimmten Gegebenheiten anpassen?
 - a. Welchen Einfluss nimmt die ...
 - i. ... Hierarchie?
 - ii. ... Zeit?
 - iii. ... Arbeitsumgebung?
 - iv. ... Kollaboration?

16. Welche für den Rüstvorgang entscheidenden Unterschiede bestehen zwischen den Mitarbeitern hinsichtlich der Arbeitsausführung?
 - a. Was ist dabei von Vorteil / Nachteil?
17. Wie würden Sie Ihre Entscheidungsfreiheit im Rahmen des Rüstprozesses beschreiben?
 - a. Fühlen Sie sich bei Ihren Entscheidungen „frei“ (genug)?
 - b. Inwieweit würden Sie sich im Gegensatz dazu mehr Rückhalt durch klare Vorgaben wünschen?
 - i. Würden Sie Ihre Vorgehensweise entsprechend ändern?
18. Wie werden nützliche Informationen rund um den Arbeitsprozess dokumentiert?
 - a. Welche Standards gibt es?
 - b. Welche Tools nutzen Sie dazu?
 - c. Inwiefern profitieren Sie von einer etwaigen Dokumentation?
 - d. Wie oft dokumentieren Sie abgeschlossene Arbeiten und Projekte?
 - e. Wie sieht die Dokumentation im Detail aus?
 - f. Welche Vorteile ziehen Sie aus einer gründlichen Dokumentation?
 - g. Wie aktuell sind die Dokumente?
 - h. Wie oft sind die Dokumente am richtigen Ort zur richtigen Zeit?
 - i. Welche Schwierigkeiten treten dabei auf?
19. Wie oft archivieren Sie hilfreiche Informationen / Lösungsansätze / Best-Practice-Lösungen / schlechte Erfahrungen?
 - a. Wo stellen Sie solche Lösungen Kollegen zur Verfügung?
 - b. Welche offiziellen Wege oder standardisierte Vorgaben zur Dokumentation von Ergebnissen / Lösungen / Wissen gibt es?
20. Wie gestaltet sich der Informationsaustausch zu den vor- und nachgelagerten Prozessen bzw. Abteilungen?
 - a. Wie wird aktiv Wissen sowohl formell als auch informell weitergegeben?
 - b. Welche Kommunikationswege werden genutzt?
 - c. Welche Technologien werden genutzt?
 - d. Welche Feedback-Quellen gibt es?
21. Was verstehen Sie unter „Erfahrungswissen“?
 - a. Welcher Arbeitsschritt bzw. welche Stelle des Rüstprozesses ist am stärksten von der Erfahrung des Bedieners abhängig? Wieso?
 - b. Inwiefern könnte man dieses Wissen speichern und vermitteln?
 - c. Inwiefern ist der Erfolg der Arbeit stark von dem Wissen der Beteiligten abhängig?
22. Was passiert, wenn Sie mit Ihrem Wissen bzw. Ihrer Erfahrung nicht weiterkommen?
23. Wie gehen Sie vor, um Wissen zu speichern bzw. Erfahrung aufzubauen?
 - a. Wie merken Sie sich Sachverhalte?
 - i. Inwiefern gehen Sie dabei systematisch oder zufällig vor?
 - b. Wie vermitteln Sie Ihr Wissen bzw. Ihre Erfahrungen Anderen?
 - c. Von welcher Quelle schöpfen Sie Ihr Wissen bzw. Ihre Erfahrungen?
 - i. Was sind „Wissens- bzw. Erfahrungsquellen“?
24. Inwiefern geben Sie Ihr Wissen weiter?
 - a. Was motiviert Sie, Wissen weiterzugeben?
25. Inwiefern ziehen Sie die Hilfe Ihrer Kollegen heran?
 - a. Nach welchen Kriterien suchen Sie sich Ihre Ansprechpartner aus?
26. Wann fragen Sie auch Kollegen oder andere Menschen nach Hilfestellungen?
 - a. Wenn nicht, warum fragen Sie sie nicht?
 - b. Woher wissen Sie, wer der richtige Ansprechpartner ist?
 - c. Wie viele Ansprechpartner kennen Sie?
 - d. Nach welchen Kriterien suchen Sie selber Ansprechpartner aus?
 - e. Inwieweit wissen Sie, wer in Ihrer Organisation welches Wissen besitzt?
 - f. Woher wissen Sie, wie die Kompetenzen im Betrieb verteilt sind?

27. Wie oft wenden sich auch andere Kollegen an Sie, wenn diese fachliche Hilfe benötigen?
 - a. Wovon hängt Ihre Hilfsbereitschaft ab?
 - b. In welcher Situation würden Sie auch Personen helfen, die Sie nicht persönlich kennen?
 - i. Wie oft passiert das?
 - c. Wie kann man Sie bzw. Ihre Kollegen zur Kooperation und gegenseitiger Hilfeleistung motivieren?
28. Nennen und beurteilen Sie mögliche Arbeitsbelastungen und -beanspruchungen (physisch, psychisch) im Zuge des Rüstprozesses.
 - a. Wie anstrengend ist die Rüsttätigkeit, auch im Hinblick auf gesamte Schichttätigkeit?
 - b. Wann setzt bei Ihnen Ermüdung ein?
 - c. Wie beurteilen Sie die Arbeitsumgebung beim Rüsten? (Beleuchtung, Luftqualität, Lärm/Schall)
29. Wie kann ein Anreizsystem / Abrechnungsmodell / Punktesystem helfen den Rüstprozess zu verbessern?
 - a. Was erhöht ihre Motivation?
 - b. Welche Rolle spielt die Technologie?
 - c. Welche Rolle spielt die Technik-Affinität?
 - d. Was mindert Ihre Motivation?
30. Welche Informationen würden Sie gerne einfacher und schneller erhalten?
 - a. Welche Fähigkeiten wünschen Sie sich, die Ihre Kollegen möglicherweise schon haben?
 - b. Welche (digitalen) Geräte würden Sie in diesem Zusammenhang gerne nutzen? Warum?
 - i. Was muss gegeben sein, damit Sie digitale Systeme in Ihrem Arbeitsalltag nutzen können?
31. In welchen Situationen wird kontinuierlich versucht implizites Wissen explizit zu machen?
 - a. Wie oft passiert dies?
32. Wie oft werden sowohl Best-Practice-Lösungen als auch schlechte Erfahrungen organisationsweit genutzt? Beschreiben Sie Ihre Ausführungen auch anhand von Beispielen.
33. Welche Kreativitäts- und Innovationstechniken setzen Sie ein, um Probleme zu lösen oder neue Ideen, Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln?
34. Welche Verbesserungen würden Sie in Bezug auf den Rüstprozess vornehmen? Wieso?

Code	Beschreibung
aktuelle Unterstützungsformen	<ul style="list-style-type: none"> – zwingend notwendige Unterstützungsformen („Must-Haves“), die als Informationsträger vorliegen müssen – Bestandteile: Dokumente/Instruktionen, Personal zum richtigen Zeitpunkt, physische Unterstützung durch Produktionshilfsmittel (Werkzeuge, PPS-Systeme, Biegeprogramme, Internetzugang etc.) und explizierbare Strategien/Vorgehensweise (z. B. „Cognitive Strategy“, organisatorische Maßnahmen) auf einem höheren Abstraktionsniveau
Bereitschaft für neue Technologien	<ul style="list-style-type: none"> – Bereitschaft bzw. Akzeptanz des Personals hinsichtlich der Verwendung neuer technologischer (digitaler) Systeme im betrieblichen Alltag
besondere Merkmale des Rüstprozesses	<ul style="list-style-type: none"> – Vorgehensweisen und Besonderheiten im Zuge des Rüstprozesses, die der standardisierte bzw. „normale“ Rüstvorgang nicht umfasst, die eine besondere Aufmerksamkeit bzw. hohe Konzentration erfordern und die sowohl in regelmäßigen Abständen auftreten als auch Unregelmäßigkeiten unterliegen können. – Einstellmaßnahmen während des (mechanischen) Rüstvorgangs und im Zuge der Programmierung/Korrekturmaßnahmen – Besonderheiten der Maschinen/Werkzeuge/Materialien
Feedback-Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> – Durch Feedback ausgelöste Reaktionen (Änderungen der Vorgehensweise in aktuellen und nachfolgenden Prozessschritten, d. h. im Anschluss des Rüstvorgangs) und Folgen (Ausschuss und Nacharbeit)
fehlende Informationen	<ul style="list-style-type: none"> – wiederkehrendes Fehlen von spezifischen Informationen – Nicht-Vorliegen erfolgskritischer und spezifischer Informationen/Inhalte (mit unmittelbarem Bezug zum Rüstprozess), u. a. hinsichtlich Arbeitsanweisungen und Vorgehensweisen (persönlich und schriftlich), Produktionshilfsmittel (PPS-System, Biegeprogramm, Material- und Chargenbeschaffenheit, Werkzeugmontage und -zustand, Maschinenkapazität und -zustand) sowie in Bezug auf generelle Besonderheiten bzw. „Kniffe“
fehlendes Feedback	<ul style="list-style-type: none"> – Nicht zur Verfügung stehende oder fehlerhaft bzw. unzureichend vorliegende Elemente des Feedbacks
fehlende oder mangelnde Unterstützung	<ul style="list-style-type: none"> – zwingend notwendige Unterstützungsformen („Must-Haves“), die als Informationsträger <u>nicht</u> vorliegen – Nicht existente Bestandteile: Dokumente/Instruktionen, Personal zum richtigen Zeitpunkt, physische Unterstützung durch Produktionshilfsmittel (Werkzeuge, PPS-Systeme, Biegeprogramme, Internetzugang etc.) und explizierbare Strategien/Vorgehensweise (z. B. „Cognitive Strategy“, organisatorische Maßnahmen) auf einem höheren Abstraktionsniveau
gewünschte Unterstützungsformen	<ul style="list-style-type: none"> – Vorliegen von Unterstützungsformen, die nicht zwingend erforderlich sind („Nice-to-Have’s“)
Informationszugang	<ul style="list-style-type: none"> – personenspezifischer, erfolgreicher, geografischer, cloud-basierter Zugang zu Informationen – wissensbasierte und wissensübermittelnde Informationen – Beschreibung des Sachproblems ohne Einbeziehung anderer Parteien
Integration des Feedbacks in den Prozess	<ul style="list-style-type: none"> – Existenz verschiedener Feedbackarten zu einem bestimmten Zeitpunkt. – Feedbackarten: Prüflöhre, Personal bzw. Vorgesetzte sowohl innerhalb der Produktionsumgebung als auch abteilungs- und produktionsübergreifend (z. B. Produktion-Konstruktion), optische Sichtkontrolle (um nachgelagerten Produktionsschritten gerecht zu werden), Stückzahlen-Überprüfung und Erst- bzw. Grenzmuster
kollaborative Zusammenarbeit	<ul style="list-style-type: none"> – direkte, unmittelbare, kollaborative Zusammenarbeit des Personals
Kommunikationsdefizite	<ul style="list-style-type: none"> – Defizite der Kommunikationswege hinsichtlich Medien, Zeitpunkt, Frequenz und Durchführung des Informationsaustauschs oder die Wahl eines falschen Ansprechpartners

Abb. A6: Code-Übersicht im Zuge der Datenanalyse – Teil 1 von 3

Code	Beschreibung
Kommunikationswege • Persönliche Kommunikationsbeziehungen • Kommunikationsbeziehung über (technische) Medien	<ul style="list-style-type: none"> – Austausch bzw. Transfer von Informationen zwischen zwei oder mehreren beteiligten Personen – Informationsaustausch auf der oberen Abstraktionsniveau – potenzielle Kommunikationsmedien: Mobiltelefone / Smartphones, persönliches Gespräch, Notebook etc. – Kommunikation auf offiziellem Weg (Shopfloor-Runden, Schichtübergaben) oder inoffiziell Weg (Gespräche während der Schicht)
Lernen	<ul style="list-style-type: none"> – (Lern-)Strategien zur Aneignung von praktischem und theoretischem Wissen
Ökonomische Sicht auf den Rüstprozess	<ul style="list-style-type: none"> – ökonomische Aspekte des Rüstprozesses selbst (z. B. tatsächlich benötigte Kapazitäten, u. a. Rüstzeit) und in Bezug auf die Durchführung des Rüstprozesses (z. B. Personaleinsatz, Materialpreise, Materialqualität) – Etwaige Abhängigkeit bzw. gegenseitige Beeinflussung der Aspekte
Organisation und Planung	<ul style="list-style-type: none"> – Kapazitätsaufteilungen (z. B. Einplanung der Aufträge und damit der Rüstprozesse, -häufigkeiten, Instandhaltung) mit entsprechendem zeitlichen Hintergrund – personelle Tätigkeitsbereiche bzw. Arbeitszuweisungen.
Persönlichkeitsmerkmale	<ul style="list-style-type: none"> – Persönlichkeitsmerkmale mit einem potenziellen Einfluss auf die Rüst-Performance
Autonomie	<ul style="list-style-type: none"> – Selbstbestimmung des Arbeitsgebietes (z. B. Erstellung des Biegeprogrammes)
„Goal Setting“	<ul style="list-style-type: none"> – Beeinflussung der Motivation und Performance durch die (Nicht-)Erreichung von persönlich gesetzten Zielen
Hierarchie	<ul style="list-style-type: none"> – Erteilung von Weisungsbedingungen bzw. Befehlsbeauftragungen
Vertrauen / Wahrnehmung	<ul style="list-style-type: none"> – Zusammenspiel von Vertrauen zu Vorgaben von Vorgesetzten
Risikowahrnehmung	<ul style="list-style-type: none"> – Wahrnehmung von bestimmten, risikobehafteten Situationen (inklusive etwaigem Erfahrungsschatz)
Risikohaltung	<ul style="list-style-type: none"> – persönliche, grundsätzliche Haltung zu auftretenden Risiken – potenzielle Risiken: gesundheitliche Risiken, ökonomische Risiken (Ausschuss), berufliche Risiken (Erhalt der Arbeitsstelle) und/oder soziale Risiken (Unsicherheiten aus Kommunikationsbeziehungen)
Perzeption bzw. Umgang mit der Arbeitsbelastung und -beanspruchung	<ul style="list-style-type: none"> – physische (körperliche Anstrengung) und psychische (mentale Anstrengung) Belastung und Beanspruchung im Zuge der Durchführung des Rüstprozesses
Präsentationsformate	<ul style="list-style-type: none"> – Einfluss von unterschiedlichen Feedback- bzw. Präsentationsformaten oder -darstellungen, die sich auf verschiedene Weise auf die Performance des Einrichters hinsichtlich des Rüstprozesses auswirken
praktische Vorgehensweisen	<ul style="list-style-type: none"> – unterschiedliche praxisorientierte generelle und rüst-spezifische Vorgehensweisen der Arbeitspersonen
Profil des Teilnehmers	<ul style="list-style-type: none"> – gender- und altersspezifischer Effekte und Kontextinformationen (z. B. Lebenslauf, Hierarchieebene) mit indirekten Informationen hinsichtlich der Erfahrungswerte der Person – Trennung der Erfahrung in fachliche (positionsgenaue) und betriebliche Erfahrung – Wissenstransfer aus unterschiedlichen Bereichen
qualitätsorientierte Evaluation des Rüstprozesses	<ul style="list-style-type: none"> – Beurteilung der Qualität des Rüstprozesses anhand von Fehlerbildern des Endproduktes, des Zustands der Maschine / der Werkzeuge / des Materials und der Strukturgestaltung der Rüstvorgehensweise
qualitätsrelevante (externe) Einflüsse	<ul style="list-style-type: none"> – Einfluss externer Elemente, wie z. B. der Mensch, die Maschine, das Material, die Werkzeuge oder Anzahl der Rüstvorgänge, auf die Sicherstellung der Qualität des Rüstprozesses
qualitätsrelevante Vorgänge	<ul style="list-style-type: none"> – Abläufe für die Sicherstellung der Qualität des Rüstprozess, v.a. im Hinblick auf erforderliche Einstellmaßnahmen unter Berücksichtigung des Zusammenspiels von Werkzeug, Maschine und Material

Abb. A7: Code-Übersicht im Zuge der Datenanalyse – Teil 2 von 3

Code	Beschreibung
Rolle der Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> – Abbildung eines Wissensstands durch historisch belegbares bzw. praktisch erlebtes Wissen („Learning-by-Doing“) zusammen mit gewonnenen Erkenntnissen/Fakten in formalisierter oder nicht-formalisierter Form – Bereiche des Erfahrungswissens: Maschine, Werkzeug, Halbzeug sowie Prozess- und Kommunikationsbeziehungen bzw. -abläufe
Rolle der fachlichen Ausbildung bzw. Qualifikation	<ul style="list-style-type: none"> – Nachweis des personenspezifischen theoretischen Hintergrunds, gekennzeichnet durch einen offiziellen Teil, der die (nicht) fachbezogene Ausbildung und Schulungen beinhaltet, und einen inoffiziellen Teil, der sich durch Belehrungen des Vorgesetzten – vermeintlich geringer Einfluss der Ausbildung auf die Rüst-Performance (Hintergrundwissen)
Rolle des impliziten Wissens	<ul style="list-style-type: none"> – selbstverständliches, nicht explizierbares und durch praktische bzw. verkörperte Handlungen ausgedrücktes Know-How (und Know-Why), das Teil des Erfahrungswissens sein und sich nicht willentlich vermitteln lassen kann – proportionaler Anstieg der Tragweite des impliziten Wissens mit der Variabilität des Sachverhaltes – antiproportionaler Anstieg der Tragweite des impliziten Wissens zum Dokumentationsstand eines Sachverhaltes
rüstspezifische Schwierigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> – (un-)regelmäßig vorliegende Schwierigkeiten und ggf. damit verbundene Probleme im Zuge des Rüstprozesses
Rüstspezifische technische Einstellungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> – Beschreibungen der einzelnen Maschinenachsen anhand der Einstellungsmaßnahmen im Biegeprogramm und der mechanischen (Fein-)Anpassungen der Werkzeugelemente auf Grundlage der Fehlerbildererkennung
Schritte des Rüstprozesses	<ul style="list-style-type: none"> – sämtliche durch den Maschineneinrichter im Zuge des Rüstvorgangs zu verrichtende Operationen
Unterstützungsformen für Lernprozesse	<ul style="list-style-type: none"> – derzeitige Lernunterstützungen und Integration der Arbeitsperson in die Dokumentation (ggf. Ausgangspunkt für die Motivation zur Gewährleistung des Prozessfortschritts)
Variationen des Rüstprozesses • Individuelle Vorgehensweise • Externe Einflüsse	<ul style="list-style-type: none"> – unterschiedliche Vorgehensweisen, die durch externe Einflüsse oder individuelle Vorgehensweise hinsichtlich der Durchführung des Rüstprozesses charakterisiert sind
Visionen / Verbesserungsvorschläge / Ausblick	<ul style="list-style-type: none"> – mögliche zukünftige Veränderungen im Rahmen des Rüstprozesses mit einem Beitrag zur Optimierung und/oder Neugestaltung des im betrieblichen Umfelds eingebetteten Rüstvorgangs
Wichtige Informationen	<ul style="list-style-type: none"> – erfolgskritischer und spezifischer Informationen/Inhalte (mit unmittelbarem Bezug zum Rüstprozess), u. a. hinsichtlich Arbeitsanweisungen und Vorgehensweisen (persönlich und schriftlich), Produktionshilfsmittel (PPS-System, Biegeprogramm, Material- und Chargenbeschaffenheit, Werkzeugmontage und -zustand, Maschinenkapazität und -zustand) sowie in Bezug auf generelle Besonderheiten bzw. „Kniffe“
Wissensweitergabe	<ul style="list-style-type: none"> – personenspezifische Weitergabe von Wissen (Erfahrungswerte, Lehrbücher etc.), auch unter Berücksichtigung der sozialen Perspektive

Abb. A8: Code-Übersicht im Zuge der Datenanalyse – Teil 3 von 3

1. Wie gefällt Ihnen die manuelle Handhabung der AR-Brille?
2. Wie empfinden Sie die Komfortbedingungen der Datenbrille?
3. Wie haben Ihnen die Interaktionsmöglichkeiten des Systems gefallen?
4. Wie schnell haben Sie die Interaktionen erlernt?
5. Sind die Interaktionen eingängig?
6. Wie fühlen Sie sich bei der Ausführung der Interaktion?
7. Welche Interaktionsmöglichkeit hat Ihnen am besten gefallen?
8. Wie haben Sie die Leistung des Systems wahrgenommen?
9. Wie hat Ihnen die grafische Darstellung der virtuellen Objekte bzw. des Systems gefallen?
 - a. Wie beurteilen Sie die Sichtbarkeit (Kontrastdarstellung und Helligkeitseinstellung) und die farbliche Visualisierung der Informationen?
 - b. Inwieweit ist die Genauigkeit der Darstellung ausreichend?
 - c. Inwieweit fügen sich Screens zur Darstellung in der realen Welt ein?
10. Wie beurteilen Sie die sprachliche Ausführung?
11. Wie beurteilen Sie die Interaktionsschaltflächen?
 - a. Welche Symbole oder Icons waren nicht verständlich? Warum?
12. Schätzen Sie ihre AR-Skills mit Hilfe einer Schulnote ein!
13. Wie schätzen Sie den Informationsgehalt einer AR-Rüstanleitung ein?
 - a. Inwieweit konnte eine eindeutige Informationsdarstellung generiert werden?
 - b. Welche Informationen waren nicht eindeutig bzw. unklar?
14. Was hat Ihnen an den Interaktionsmöglichkeiten der HoloLens besonders gefallen?
15. Was hat Ihnen an den Interaktionsmöglichkeiten der HoloLens nicht gefallen?
16. Was war hinderlich und warum war es hinderlich?
 - a. Wie könnte man es verbessern?
17. Was hat Sie in ihrem Arbeitsablauf gestört?
 - a. Warum hat es gestört?
 - b. Wie kann man es verbessern?
18. Wo sehen Sie die Potenziale der AR-Technologie?
 - a. Welche Potenziale sind bisher nicht ausgeschöpft?
 - b. Was muss gemacht werden, damit die Potenziale ausgeschöpft werden können?
19. Stellen Sie sich ein Produktionsprozess vor, dass von einem AR-System begleitet werden soll. Was wäre Ihrer Meinung nach eine möglichst effiziente Interaktion, um Informationen in die AR-Brille einzugeben? Gehen Sie dabei von einer lauten Umgebung aus, sodass die Sprachsteuerung keine Alternative darstellt.
20. Welche Art der Informationsvisualisierung hat Ihnen besonders gut / weniger gut gefallen?
21. Welche Art der Informationsvisualisierung hat den größten / geringsten Informationsgehalt?
22. Welche Art der Informationsvisualisierung hat Ihnen am besten ermöglicht, die Rüstschritte durchzuführen?
23. In welchem Umfang konnten Sie Erfahrungen bezüglich des Rüstvorgangs mit Hilfe des Systems vermittelt bekommen?
24. Beschreiben Sie die Übersichtlichkeit des Interfaces.
25. An welcher Stelle haben Sie das Gefühl, dass wichtige Informationen verloren gehen, weil sie diese nicht übermittelt bekommen haben?
26. Stellen Sie dar, wie sie durch das System navigierten.
27. Wie beurteilen Sie die Orientierung innerhalb des Rüsteditors?
 - a. Wussten Sie jederzeit, wo Sie sich innerhalb der Anwendung befinden?
28. Inwiefern hätte sich Ihr Umgang mit dem System verändert, wenn Sie keine Einführung bzw. kein Tutorial erhalten hätten?

Abb. A9: Interview-Leitfaden zur Evaluierung des Prototyps

Logistikschritt



Bezeichnung

- Bestücken des Schattenboards

Aufgabenbeschreibung

- Entnahme der Werkzeuge bzw. Boxen
- Platzierung der Elemente auf dem zugewiesenen Platz des Schattenboards
- Bestätigung des Vorhandenseins der Elemente über beiliegende Checkliste

Rüstschrift #1



Werkzeug

- Dorn

Hilfsmittel

- 22 mm Schraubenschlüssel



Normteile

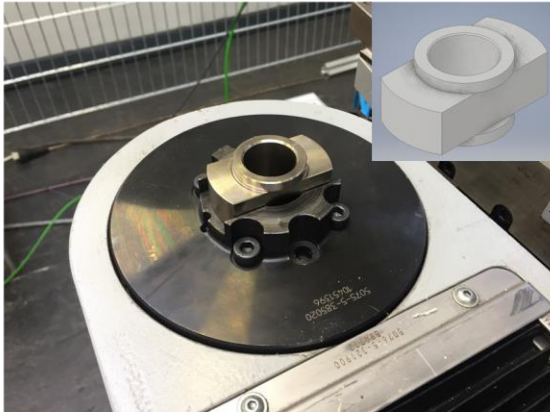
- -

Aufgabenbeschreibung

- Einschrauben in die Dornstange per Hand
- Festschrauben mit Schraubenschlüssel

Abb. A10: Papierbasierte und örtlich gebundene Rüstanleitung – Teil 1 von 6

Rüstschrift #2



Werkzeug

- Passfederring Wafios

Hilfsmittel

- -

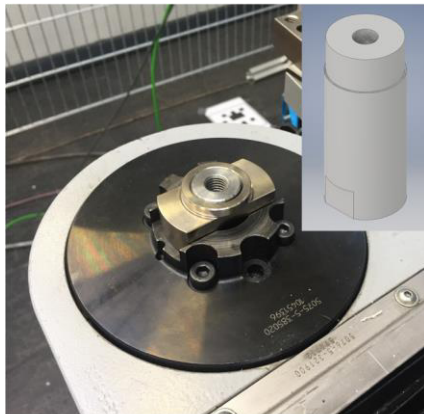
Normteile

- -

Aufgabenbeschreibung

- In die Nut der Achsenplatte einstecken
- Ggf. mit Gummihammer (vorsichtig) einklopfen

Rüstschrift #3



Werkzeug

- Gewindeeinsatz Biegeachse

Hilfsmittel

- -

Normteile

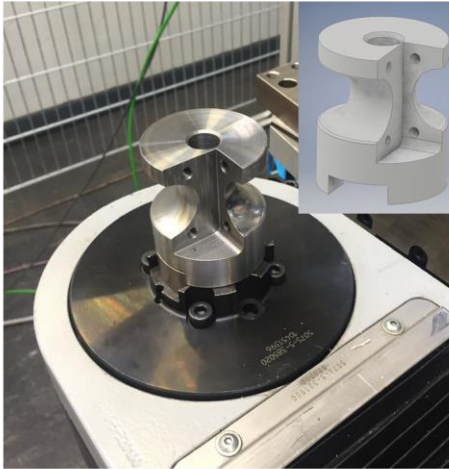
- -

Aufgabenbeschreibung

- Handfest so weit wie möglich von Hand einschrauben

Rüstschrift

#4



Werkzeug

- Biegeform

Hilfsmittel

- -

Normteile

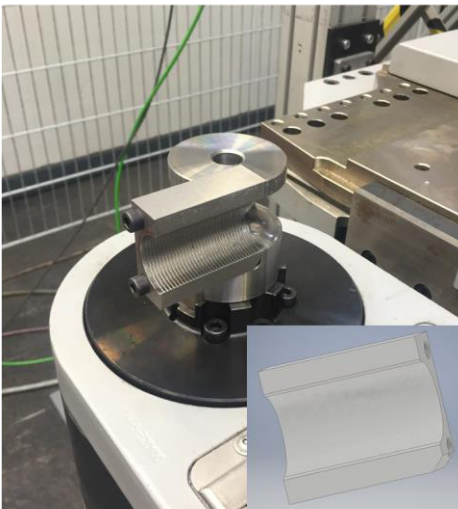
- -

Aufgabenbeschreibung

- Auf den Gewindeinsatz stecken

Rüstschrift

#5



Werkzeug

- Innere Spannbacke

Hilfsmittel

- 5mm Innensechskantschlüssel



Normteile

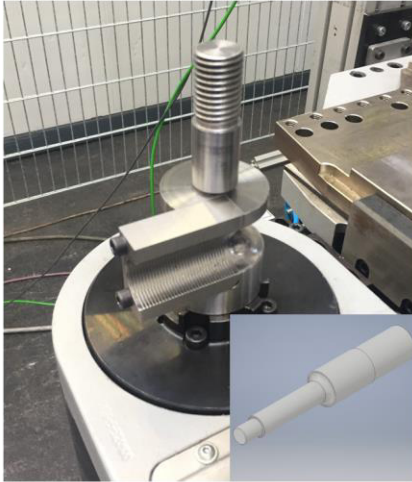
- 2x ISO 4762 M6x70

Aufgabenbeschreibung

- An der Biegeform montieren

Rüstschrift

#6



Werkzeug

- Bolzen

Hilfsmittel

- -

Normteile

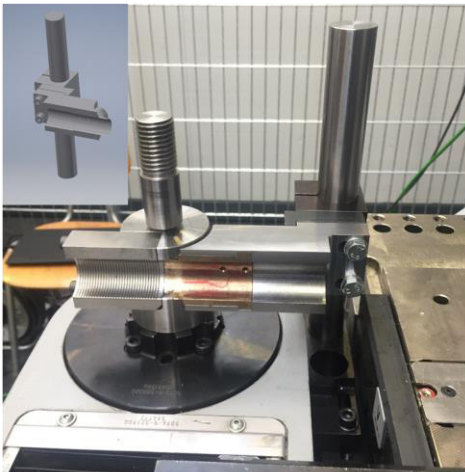
- -

Aufgabenbeschreibung

- In den Gewindeeinsatz handfest einschrauben

Rüstschrift

#7



Werkzeug

- Faltenglätter

Hilfsmittel

- -

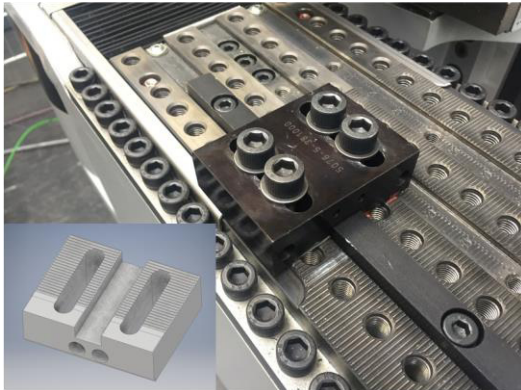
Normteile

- -

Aufgabenbeschreibung

- Auf die Führungsplatte (linke bzw. erste Aufnahme) aufstecken
 → **Vorsicht: scharfe, leicht abbrechende Kante!**

Rüstschrift #8



Werkzeug

- Schieber

Hilfsmittel

- 8mm Innensechskantschlüssel



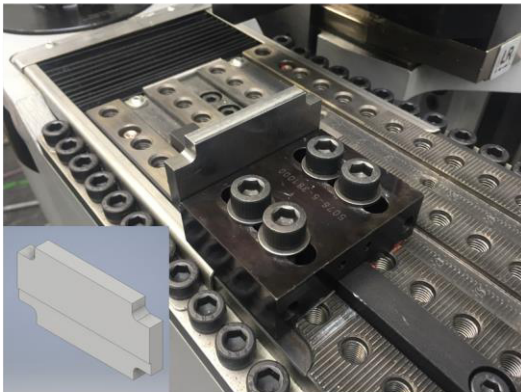
Normteile

- 4x ISO 4762 M10x50
- 4x Unterlegscheibe

Aufgabenbeschreibung

- Auf die Passfeder setzen
- Ausrichten an roter Markierung
- Anschrauben

Rüstschrift #9



Werkzeug

- Platte zur Klemmkraftübertragung

Hilfsmittel

- -

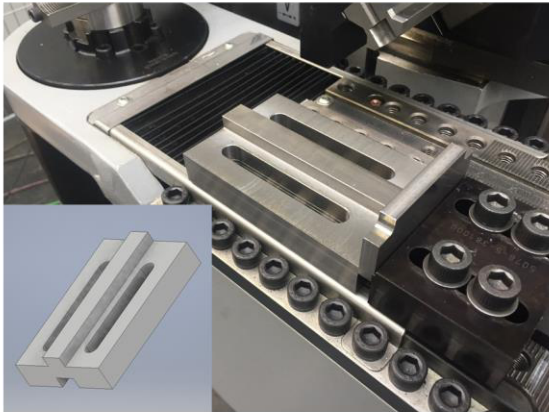
Normteile

- -

Aufgabenbeschreibung

- Nut an den Schieber anlegen

Rüstschrift #10



Werkzeug

- Platte zur Höhenverstellung

Hilfsmittel

- -

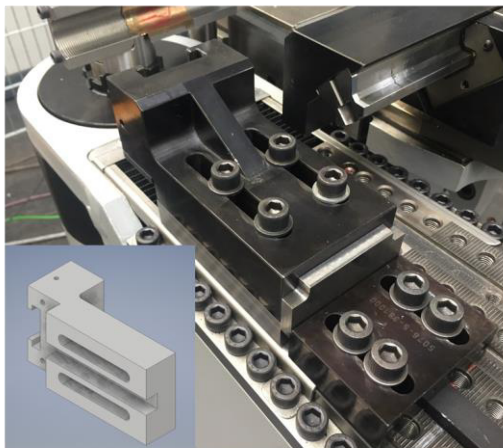
Normteile

- -

Aufgabenbeschreibung

- Auf die Passfeder setzen
- An die Platte zur Klemmkraftübertragung schieben

Rüstschrift #11



Werkzeug

- Klemmbock

Hilfsmittel

- 8mm Innensechskantschlüssel



Normteile

- 4x ISO 4762 M10x80
- 4x Unterlegscheibe

Aufgabenbeschreibung

- An die Platte zur Klemmkraftübertragung schieben
- Auf die Platte zur Höhenverstellung montieren

```

1  %% Resting Activity Measurement (RAM) / Ruheaktivitaetsmessung
2  % Demonstration der EMG-Toolbox: Berechnung der Ruheaktivitaet (pro Kanal) aus einer
  einzigen Messdatei
3  % * Anzeige als Plot
4  % * Anzeige als Tabelle und
5  % * Speicherung als *.mat-Datei
6
7  %% Vorbereitungen der EMG-Toolbox
8  % * Schließen aller offenen Plots/Figures
9  % * Bereinigung des Workspace (Loeschen aller Variablen aus anderen Skripten)
10 % * Hinzufuegen des EMG-Toolbox-Pfads zum aktuellen Matlab-Pfad
11 % * Bereitstellung der EMG-Toolbox
12 close all
13 clear all
14 addpath('..\Matlab/');
15 import('emgToolbox.*');
16
17 %% Einstellungen, Auswahl der Quell- und Zieldateien
18 % Zusammenstellung folgender Elemente:
19 % * |folder|: Ordner von Quell- und Zieldateien
20 % * |srcfile|: Alle Quell-Dateien der Ruheaktivitaetsmessungen(ohne Pfad, Dateinamen
  + Endung .txt)
21 % * |dstfile|: Ziel-Datei fuer das Ergebnis (*.mat-file)
22 folder = '..\VPX';
23 srcfile = 'RAM.txt';
24 dstfile = 'RAM.mat';
25
26 %% Auswertung: Einlesen der Messdaten und Berechnung der Ruheaktivitaet
27 % Einlesen und Auswertung der Messdaten
28 % Ergebnisdarstellung jeweils in einem _cell array_
29
30 % Dateipfad aus Datei + Zusammensetzung des Ordners
31 file = fullfile(folder, srcfile);
32
33 % Einlesen der Messdaten
34 EmgTemp = emg.raw.importNoraxon('file', file);
35
36 % Auswahl von EMG-Messdaten (Einheit: 'uV')
37 idxEmg = EmgTemp.find('unit', 'uV');
38 EmgTemp = EmgTemp(idxEmg);
39
40 % Berechnung der Aktivitaet + Hinterlegen dateispezifischer Cell-Arrays
41 EaRam = emg.activity(EmgTemp, 'blocksize_seconds', 0.1);
42
43 % Berechnung der minimalen Aktivitaet
44 EaMinRam = emg.activityMin(EaRam, 'windowsize_seconds', 10.0);
45
46 %% Ergebnisdarstellung 1: Plots
47 % Plots:
48 % * Aktivitaetsverlauf (EA) fuer jeden Kanal
49 % * Minimale Aktivitaet (EA_min)
50 % * Zeitfenster der minimalen Aktivitaet
51 multiplot.plot(EaMinRam, EaRam);
52
53 %% Ergebnisdarstellung 2: Tabelle
54 % Generierung einer Tabelle + Anzeige im Variablen-Editor
55 TblEaMinRam = table(EaMinRam);
56 openvar('TblEaMinRam');
57
58 %% Speicherung des Ergebnisses
59 % Speicherung der Ruhe-Aktivitaeten, d.h. der Inhalt der Variable |EaMinRam|, zwecks
  Weiterverarbeitung (Normalisierung) in einem *.MAT-File
60 file = fullfile(folder, dstfile);
61 save(file, 'EaMinRam')
62 disp(['Saved as ' file]);

```

Abb. B1: Matlab-Skript zur Berechnung der muskelspezifischen Ruheaktivität

```

1  %% Maximum Voluntary Contraction (MVC) / Maximalkraftmessung
2  % Demonstration der EMG-Toolbox: Berechnung der Maximalkraft (pro Kanal) aus mehreren
   unterschiedlichen Messdateien
3  % * Anzeige als Plot
4  % * Anzeige als Tabelle und
5  % * Speicherung als *.mat-Datei
6
7  %% Vorbereitungen der EMG-Toolbox
8  % * Schließen aller offenen Plots/Figures
9  % * Bereinigung des Workspace (Loeschen aller Variablen aus anderen Skripten)
10 % * Hinzufuegen des EMG-Toolbox-Pfads zum aktuellen Matlab-Pfad
11 % * Bereitstellung der EMG-Toolbox
12 close all
13 clear all
14 addpath('../Matlab/');
15 import('emgToolbox.*');
16
17 %% Einstellungen, Auswahl der Quell- und Zieldateien
18 % Zusammenstellung folgender Elemente:
19 % * |folder|: Ordner von Quell- und Zieldateien
20 % * |srcfile|: Alle Quell-Dateien der Maximalkraftmessungen(ohne Pfad, Dateinamen +
   Endung .txt)
21 % * |dstfile|: Ziel-Datei fuer das Ergebnis (*.mat-file)
22 folder = '..\VPX';
23 Srcfiles = {'MVC_SternoL.txt', 'MVC_SternoR.txt', 'MVC_TrapOL.txt', 'MVC_TrapUR.txt',
   'MVC_TrapUL.txt', 'Max_TrapUR.txt'};
24 dstfile = 'VPX_MVC.mat';
25
26 %% Auswertung Schritt 1: Einlesen der Messdaten und Auswertung der einzelnen
   Maximalaktivitaeten
27 % Einlesen und Auswertung der Messdaten
28 % Ergebnisdarstellung jeweils in einem _cell array_
29 % * |CEaMvc|: _cell array_ mit der _Aktivitaet_ (Zeitverlauf) der
   Maximalkraftmessungen
30 % * |CEaMaxMvc|: _cell array_ mit der _maximalen Aktivitaet_ (Spitzenwert) der
   Maximalkraftmessungen
31 % Einstellung der Blockgröße für die Berechnung der Aktivitaet (|blocksize_seconds|)
   und die Fenstergroesse bei der Bestimmung des Maximalwerts (|windowsize_seconds|)
32 CEaMvc = cell(numel(Srcfiles), 1);
33 CEaMaxMvc = cell(numel(Srcfiles), 1);
34
35 for i = 1:numel(Srcfiles)
36     % Dateipfad aus Datei + Zusammensetzung des Ordners
37     file = fullfile(folder, Srcfiles{i});
38
39     % Einlesen der Messdaten (Überschreiben für jeden Schleifendurchlauf)
40     EmgTemp = emg.raw.importNoraxon('file', file);
41
42     % Filterung der Kanäle:
43     % Auswahl von EMG-Messdaten (Einheit: 'uV')
44     idxEmg = EmgTemp.find('unit', 'uV');
45     EmgTemp = EmgTemp(idxEmg);
46
47     % Berechnung der Aktivitaet + Hinterlegen dateispezifischer Cell-Arrays
48     CEaMvc{i} = emg.activity(EmgTemp, 'blocksize_seconds', 0.1);
49
50     % Berechnung der maximalen Aktivitaet + Hinterlegen dateispezifischer Cell-Arrays
51     CEaMaxMvc{i} = emg.activityMax(CEaMvc{i}, 'windowsize_seconds', 3);
52 end
53
54 %% Auswertung Schritt 2: Globale Maximale Aktivitaet
55 % Bildung des Maximums aus allen Einzel-Aktivitaeten
56 % Inhalt EAMaxMvc-Objekt: Quelldatei, zugrundeliegenden Block- und Fenstergroessen,
   Wert und Einheit
57 EAMaxMvc = max(CEaMaxMvc{:});
58
59 %% Ergebnisdarstellung 1: quelledateiorientierte Plots
60 % Plots:
61 % * Aktivitaetsverlauf (EA) fuer jede Quell-Datei
62 % * Global maximale Aktivitaet fuer jeden Kanal (konsistente Zeitskalen der einzelnen
   Kanäle)
63 for i = 1:numel(CEaMvc)
64     multiplot.plot(CEaMvc{i}, EAMaxMvc);

```

```
65 end
66
67
68 %% Ergebnisdarstellung 2: ergebnisorientierte Plots
69 % Plots:
70 % * Global maximale Aktivitaet mitsamt einzelner Quelldateien innerhalb eines
71 Fensters (nicht identische Zeitskalen der einzelnen Kanale)
72 multiplot.plot(EaMaxMvc, CEaMvc{:}, 'Filter', 'srcfile');
73
74 %% Ergebnisdarstellung 3: ergebnisorientierte Tabelle
75 % Generierung einer Tabelle + Anzeige im Variablen-Editor
76 TblEaMaxMvc = table(EaMaxMvc);
77 openvar('TblEaMaxMvc');
78
79 %% Speicherung des Ergebnisses
80 % Speicherung der Maximal-Aktivitaeten, d.h. der Inhalt der Variable |EaMaxMvc|,
81 zwecks Weiterverarbeitung (Normalisierung) in einem *.MAT-File
82 file = fullfile(folder, dstfile);
83 save(file, 'EaMaxMvc')
84 disp(['Saved as ' file]);
```

```

1  %% Normalisierung der Messdaten + Threshold
2  %% Berechnung und Darstellung der normierten Aktivitaet der Messdatensaetze
3  %% * Anzeige als Plot
4  %% * Anzeige als Tabelle und
5  %% * Speicherung als *.mat-Datei
6  %% * Export einer Excel-Datei
7  %% * Suche nach Kanaelen, bei denen ein vorgegebener Threshold (von z.B 15%)
   ueberschritten wird
8  %% * Darstellung Datei + Kanal + Anfangs- und Endzeitpunkte, Maximalwert und Mittelwert
9
10 %% Vorbereitungen der EMG-Toolbox
11 %% * Schließen aller offenen Plots/Figures
12 %% * Bereinigung des Workspace (Loeschen aller Variablen aus anderen Skripten)
13 %% * Hinzufuegen des EMG-Toolbox-Pfads zum aktuellen Matlab-Pfad
14 %% * Bereitstellung der EMG-Toolbox
15 close all
16 clear all
17 addpath('..\\Matlab\\');
18 import('emgToolbox.*');
19
20 %% Einstellungen, Auswahl der Quell- und Zieldateien
21 %% Zusammenstellung folgender Elemente:
22 %% * |folder|: Ordner von Quell- und Zieldateien
23 %% * |srcfile|: Alle Quell-Dateien der Maximalkraftmessungen(ohne Pfad, Dateinamen +
   Endung .txt)
24 %% * |dstfile|: Ziel-Datei fuer das Ergebnis (*.mat-file)
25 folder = '..\\VPX';
26 fileRam = 'RAM.mat';
27 fileMvc = 'MVC.mat';
28 Srcfiles = {'TaskA_Step01.txt', .., 'TaskA_Step12.txt'}
29 dstfile = 'VPX_TaskA.mat';
30 fileExcell = '\\VPX_TaskA.xlsx';
31
32 % Laden der Objekte |EaMinRam| und |EaMaxMvc| in den Workspace
33 load(fullfile(folder, fileRam))
34 load(fullfile(folder, fileMvc))
35
36 %% Auswertung: Einlesen der Messdaten und Berechnung der Muskel-Aktivitaet
37 CEaNorm = cell(numel(Srcfiles, 1));
38
39 for i = 1:numel(Srcfiles)
40     srcfile = Srcfiles{i};
41
42     % Dateipfad aus Datei + Zusammensetzung des Ordners
43     file = fullfile(folder, srcfile);
44
45     % Einlesen der Messdaten
46     EmgTemp = emg.raw.importNoraxon('file', file);
47
48     % Auswahl von EMG-Messdaten (Einheit: 'uV')
49     idxEmg = EmgTemp.find('unit', 'uV');
50     EmgTemp = EmgTemp(idxEmg);
51
52     % Ausschnitt der ersten und letzten 1,5 Sekunden der Messung
53     EmgTemp = lchop_seconds(EmgTemp, 1.5);
54     EmgTemp = rchop_seconds(EmgTemp, 1.5);
55
56     % Berechnung der Aktivitaet + Hinterlegen dateispezifischer Cell-Arrays
57     Ea = emg.activity(EmgTemp, 'blocksize_seconds', 0.1);
58
59     % Normalisierung
60     EaNorm = Ea.normalize('min', EaMinRam, 'max', EaMaxMvc);
61
62     % Hinterlegen der erzeugten Daten in Cell-Array
63     CEaNorm{i} = EaNorm;
64 end
65
66 %% Ergebnisdarstellung: Plots
67 %% Plot des normierten Aktivitaetsverlaufs (EaNorm) fuer jeden Kanal und fuer jede
   Messdatei
68 %% Farbliche Markierung implausibler Regionen (normierte Aktivitaet < 0) inklusive
   Warnung in Matlab-Konsole
69

```

```

70  for i = 1:numel(CEaNorm)
71      EaNorm = CEaNorm{i};
72      multiplot.plot(EaNorm);
73  end
74
75  %% Interpretation
76  % Suche der Werte innerhalb jeder Messdatei, bei denen eine Ueberschreitung des
77  % Grenzwerts fuer eine bestimmte Zeit erfolgt
78  % Suche nach Kanaelen, bei denen der Threshold (von z.B 15%) fuer eine bestimmte
79  % Mindest-Zeit (z.B. 1 Sekunde) ueberschritten wird
80  % Darstellung Datei + Kanal + Anfangs- und Endzeitpunkte, Maximalwert und Mittelwert
81  thresholdValue = 15;
82  thresholdTime_s = .5;
83
84  ExportData = [];
85
86  for i = 1:numel(CEaNorm)
87      EaNorm = CEaNorm{i};
88
89      % dateispezifischer Plot
90      figure
91      hold on
92      legend show
93      srcfile = EaNorm(1).srcfile;
94      title(srcfile, 'Interpreter', 'none');
95      disp(' ');
96      disp(['File: ' srcfile]);
97
98      % Suche nach Ueberschreitung des Grenzwerts fuer jeden Kanal
99      for channel = 1:numel(EaNorm)
100
101          % Lesen des Kanals
102          time_s = EaNorm(channel).time_seconds;
103          value = EaNorm(channel).value;
104
105          % Lokalisierung des Wertebereichs > Grenzwert
106          [start, stop] = findsequence(value > thresholdValue);
107
108          % Identifikation der Zeitbereiche > x Sekunden
109          deltaTime = time_s(stop) - time_s(start);
110          idx = deltaTime > thresholdTime_s;
111          startC = start(idx);
112          stopC = stop(idx);
113
114          % Darstellung saemtlicher Zeitbereiche
115          for cut = 1:numel(startC)
116              idx = startC(cut) : stopC(cut);
117              timeCut = time_s(idx);
118              valueCut = value(idx);
119
120              name = EaNorm(channel).title;
121              plot(timeCut, valueCut, 'DisplayName', name);
122
123              LExpData.srcfile = srcfile;
124              LExpData.channelNo = channel;
125              LExpData.channelName = EaNorm(channel).title;
126              LExpData.time = [timeCut(1) timeCut(end)];
127              LExpData.duration = timeCut(end) - timeCut(1);
128              LExpData.mean = mean(valueCut);
129              LExpData.max = max(valueCut);
130
131              if( isempty(ExportData) )
132                  ExportData = LExpData;
133              else
134                  ExportData = [ExportData LExpData];
135              end
136          end
137
138          % textliche Darstellung
139          disp(['Channel: ' num2str(channel)]);
140          disp(['startC startC+stopC']);
141          disp(['Zeitraahmen']);

```



```
141         disp([time_s(startC) time_s(stopC)]);
142     end
143 end
144
145 %% Excel-Export
146 % Erzeugung eines Excel-Arbeitsblatts aus jeder Quell-Datei
147 for i = 1:numel(CEaNorm)
148     EaNorm = CEaNorm{i};
149     file = fullfile(folder, fileExcell);
150     EaNorm.xlsxwrite(file);
151     disp(['Written in file:' file ]);
152 end
153
154 %% Speicherung des Ergebnisses
155 % Speicherung der normierten Aktivitaeten in einem *.MAT-File
156 file = fullfile(folder, dstfile);
157 save(file, 'EaNorm')
158 disp(['Saved as ' file]);
```



HoloErgo-Studie

-

Einwilligungs-erklä- rung

&

Fragebogen

Abb. C1: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo“) – Seite 1 von 20

Einwilligungserklärung zur Erhebung und Verarbeitung personenbezogener Daten im Rahmen der Studie „HoloErgo“

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

wir bedanken uns für das von Ihnen gezeigte Interesse an der Studienteilnahme. Im Folgenden werden Ihnen die Rahmenbedingungen und Inhalte dargestellt. Bei Fragen oder Unklarheiten wenden Sie sich bitte an die Versuchsleitung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Cyberrüsten 4.0“ wird ein cyber-physisches System entwickelt, das Maschineneinrichter beim Rüstvorgang einer Rotationszugbiegemaschine unterstützt. Nähere Informationen zu dem Projekt erhalten Sie bei der Studienleitung und/oder unter folgender Webadresse: <http://www.uni-siegen.de/start/news/forschungsnews/831426.html>

Mit Ihrer Einwilligung nehmen Sie im Zuge dieses Forschungsvorhabens an der experimentellen Studie „HoloErgo“ teil, in der die Anwendung der Augmented-Reality-Datenbrille „HoloLens“ der Firma Microsoft (<https://www.microsoft.com/de-de/hololens>) im Zuge der Durchführung einer Montagetätigkeit und Blickpositionieraufgaben unter ergonomischen Gesichtspunkten untersucht wird. Wir hoffen auf Ihre Bereitschaft zur freiwilligen Teilnahme, die Sie zu jedem Zeitpunkt der Untersuchungen ohne Angabe von Gründen und ohne einen Nachteil widerrufen können.

Bitte erklären Sie, ob Sie zur freiwilligen Teilnahme an der Studie bereit sind:

ja nein

In der ca. vierstündigen Studie werden die durchgeführten Untersuchungen u.a. per Video aufgezeichnet. Darüber hinaus werden Körperdaten über elektromyographische Messungen sowie über Wärmebildaufnahmen objektiv erfasst. Weiterhin werden subjektive Daten anhand von Fragebögen generiert. Die durch die Studie erzeugten Angaben bzw. erhobenen Daten werden für wissenschaftliche Zwecke anonymisiert gespeichert, im Rahmen der Forschungsarbeit analysiert und für Veröffentlichungen verwendet. Alle Angaben, die zu einer Identifizierung der Person führen könnten, werden verändert oder aus dem Text entfernt. Im Rahmen wissenschaftlicher Veröffentlichungen werden lediglich Ausschnitte der Untersuchung zitiert. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der entstehende Gesamtzusammenhang von Ereignissen nicht zu einer Personenidentifikation gegenüber Dritten führt.

Die Studienteilnahme erfolgt auf freiwilliger Basis. Sie haben zu jeder Zeit eine Widerrufsmöglichkeit hinsichtlich der aktuell geführten Untersuchung, der Durchführung weiterer Untersuchungen sowie Ihres Einverständnisses für sämtliche Aufzeichnungen und Niederschriften. Dadurch entstehen in keinsten Weise Nachteile für Sie. Bitte wenden Sie sich diesbezüglich an den zuständigen Studienleiter Herrn Nils Darwin Abele.

Ihre personenbezogenen Kontaktdaten werden von den Evaluierungsdaten getrennt bzw. verschlüsselt und am Fachgebiet Arbeitswissenschaft/Ergonomie der Universität Siegen vom Lehrstuhlinhaber – Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Kluth – in einem verschlossenen Stahlschrank, getrennt von den Studienunterlagen (Versuchsergebnissen), über 10 Jahre sicher aufbewahrt und danach vernichtet. Im Falle eines Widerrufs Ihrer Erklärung können Sie entscheiden, ob die bereits vorliegenden Daten unverzüglich gelöscht werden müssen oder weiterverwendet werden dürfen. Die Daten sind für Dritte unzugänglich.

Sie wurden über die zu erwartenden physischen Belastungen und möglichen Risiken, wie z.B. allergische Reaktionen durch die aufgeklebten Elektroden oder muskuläre Verspannungen durch die Anwendung der HoloLens, im Rahmen dieser – an eine reale Arbeitsaufgabe angepasste – wissenschaftliche Untersuchung informiert.

Ihnen ist bekannt, dass die Universität Siegen keine Probandenversicherung für dieses Vorhaben abgeschlossen hat. Eine Haftung für Sach- und Personenschäden gegen die Universität und ihre Mitarbeiter ist ausgeschlossen, es sein denn, der entstandene Schaden beruht auf Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit.

Die vorstehenden Angaben haben Sie gelesen und verstanden. Sie stimmen der Teilnahme am Forschungsvorhaben zu und erklären sich mit Ihrer Unterschrift für die Erhebung und Verarbeitung Ihrer gemessenen Daten einschließlich der Daten hinsichtlich Alter, Gewicht, Körpergröße, Bild-, Ton- und Videoaufnahmen sowie bezüglich deren streng vertraulicher Nutzung für wissenschaftliche Zwecke durch das Studienteam einverstanden.

Siegen,

Ort, Datum

Vor- & Nachname

Unterschrift

Wir bedanken uns für Ihre Teilnahme und Bereitschaft zur Unterstützung des Forschungsvorhabens.

Allgemeine Daten

Proband-Nr. _____

Alter [Jahre] _____

Größe [cm] _____

Gewicht [kg] _____

Beruf _____

Körperliche Verfassung

Üben Sie eine sportliche Betätigung aus? ja nein

Wenn ja, welche Sportart üben Sie wie lange aus?

Sportart: _____ h / Woche: _____

Sportart: _____ h / Woche: _____

Sportart: _____ h / Woche: _____

Welchen körperlichen Fitnesszustand weisen Sie derzeit auf?

sehr gut gut mittelmäßig schlecht sehr schlecht

Wie ernähren Sie sich?

sehr gesund gesund mittelmäßig ungesund sehr ungesund

Rauchen Sie? ja nein

Wenn ja, wie viele Zigaretten rauchen Sie pro Tag?

< 10 11-20 21-30 31-40 > 40

Konsumieren Sie alkoholische Getränke? ja nein

Wenn ja, wie häufig konsumieren Sie Alkohol pro Woche?

1-2x 3x 4x 5-6x täglich

Nehmen Sie derzeit Medikamente ein? ja nein

Wenn ja, welche Medikamente nehmen Sie wie oft ein?

Medikament: _____ Dosis: _____

Medikament: _____ Dosis: _____

Medikament: _____ Dosis: _____

Haben Sie innerhalb der letzten 48 Stunden bewusstseinsbeeinflussende Substanzen (Alkohol, Drogen, Medikamente etc.) zu sich genommen? ja nein

Bestehen bei Ihnen Vorerkrankungen oder gesundheitliche Beschwerden? ja nein

Wenn ja, welche Vorerkrankungen bzw. Beschwerden?

Befinden Sie sich zurzeit in ärztlicher Behandlung? ja nein

Wenn ja, weshalb: _____

Wann haben Sie zuletzt einen Arzttermin aus welchem Grund wahrgenommen?

Zeitpunkt: _____

Grund: _____

Sind Sie momentan emotional abgelenkt? ja nein

Wenn ja, warum? _____

Sind Sie grundsätzlich leicht von einer Aufgabe abzulenken? ja nein

Vorerfahrung

Haben Sie bereits Erfahrungen mit Datenbrillen bzw. Head-Mounted Displays sammeln können? ja nein

Wenn ja, was haben Sie wie häufig und in welchem Kontext angewendet?

Gerät(e) _____

h / Woche _____

Zweck _____

Nutzen Sie Datenbrillen bzw. Head-Mounted Displays regelmäßig? ja nein

Wenn ja, was nutzen Sie wie häufig und in welchem Kontext?

Gerät(e) _____

h / Woche _____

Zweck _____

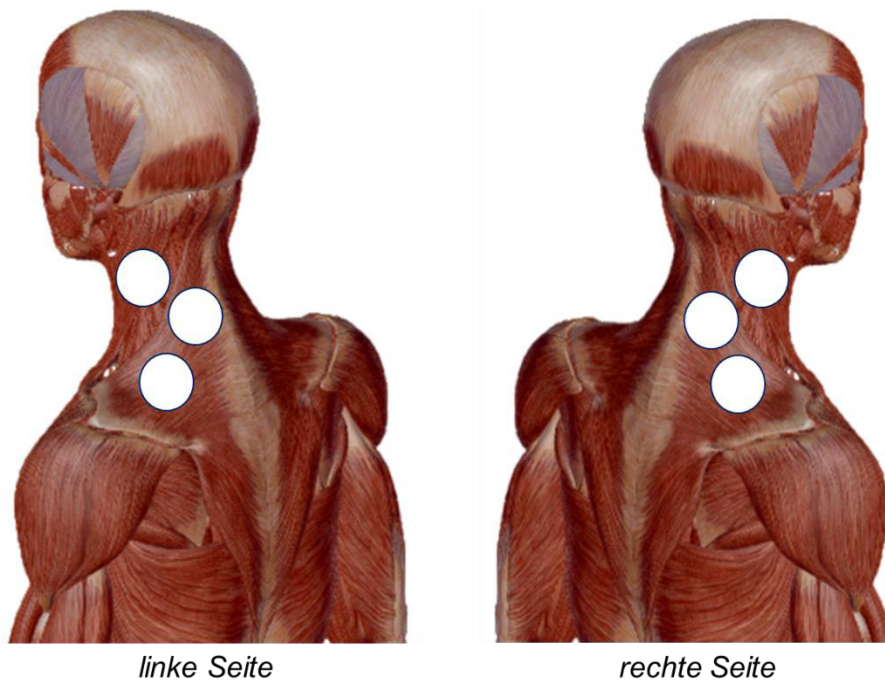
Physiologie

Wie beurteilen Sie Ihre aktuell **empfundene muskuläre Beanspruchung** in den nachfolgenden Körperbereichen im Anschluss an die Arbeitsaufgabe?

Die Beurteilungsziffer ...

- 0 (keine Beanspruchung),
- 1 (moderate Beanspruchung),
- 2 (starke Beanspruchung),
- 3 (sehr starke Beanspruchung) oder
- 4 (unerträglich starke Beanspruchung)

tragen Sie bitte in die entsprechenden Bereiche ein.



Wie beurteilen Sie Ihre aktuelle persönliche **Komfortempfindung** in den nachfolgenden Kopfbereichen im Anschluss an die Arbeitsaufgabe?

Die Beurteilungsziffer ...

- 0 (keine Beanspruchung),
- 1 (moderate Beanspruchung),
- 2 (starke Beanspruchung),
- 3 (sehr starke Beanspruchung) oder
- 4 (unerträglich starke Beanspruchung)

tragen Sie bitte in die entsprechenden Kästen ein.

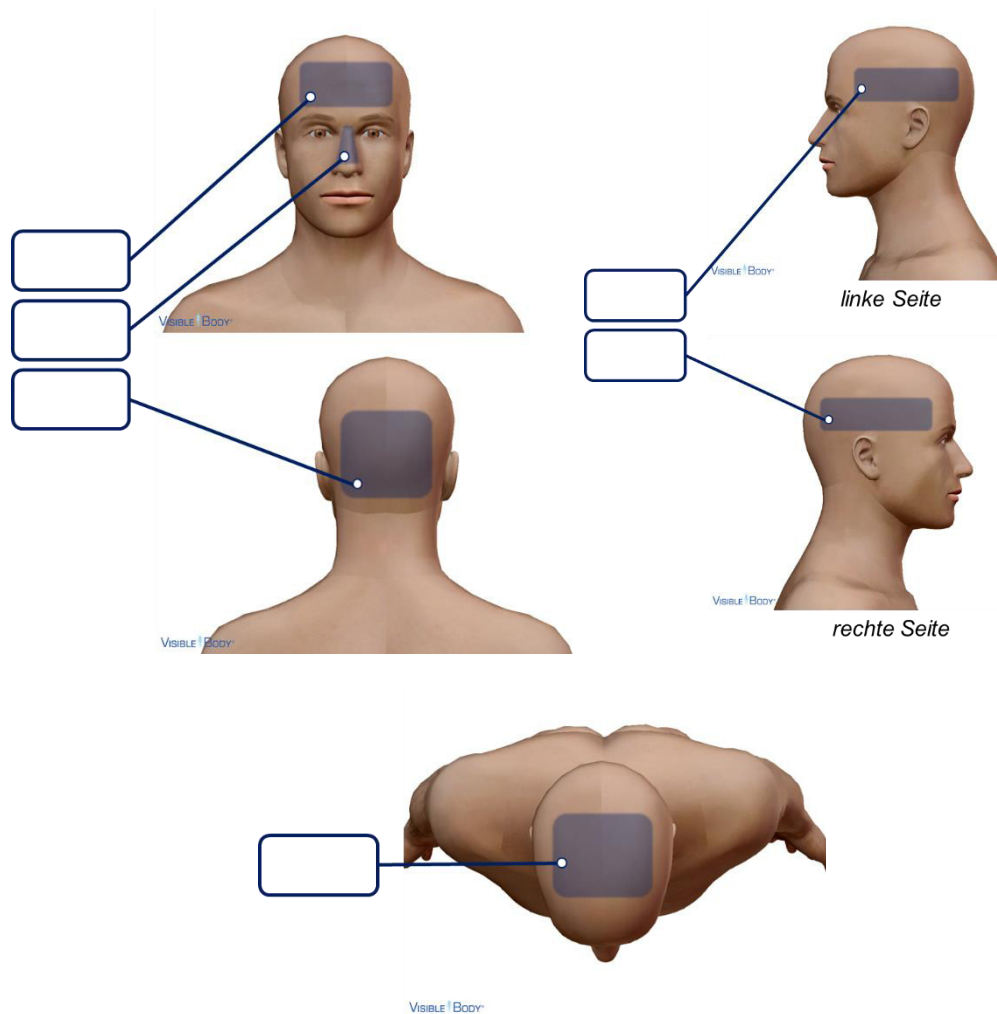
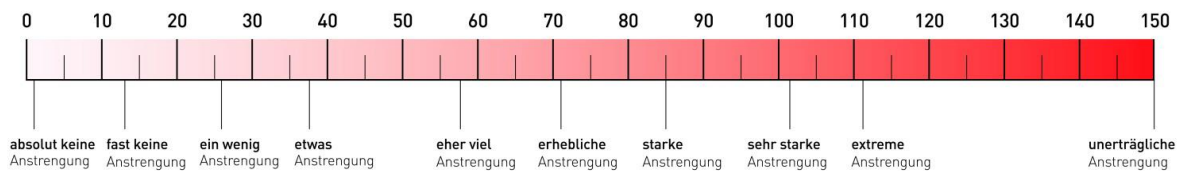


Abb. C9: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo“) – Seite 9 von 20

RSME

Beispielwerte zur Einordnung der Skala

Zweistündige Shoppingtour am Samstagvormittag in der Innenstadt	
Fernsehabend mit dem Partner oder Freunden	
Aufblasen von 50 Luftballons für eine Geburtstagsfeier	
Puzzle mit 500 Teilen	
Korrekturlesen eines 30-seitigen- Berichts am PC-Monitor	
Vierstündiger Kinobesuch von „Ben Hur“	
Beantwortung der hier aufgeführten Beispielsituationen	



RSME-Werte während und nach der Versuchsdurchführung

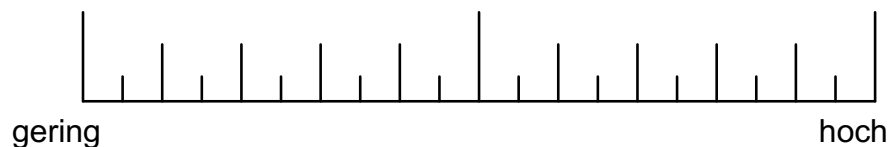
Montagetätigkeit Papierinstruktion	währenddessen	
	nachher	
Montagetätigkeit HoloLens	währenddessen	
	nachher	
Blickpositionierungen (Sprachsteuerung) Papierinstruktion	währenddessen	
	nachher	
Blickpositionierungen (Sprachsteuerung) HoloLens	währenddessen	
	nachher	
Blickpositionierungen (Gestensteuerung) Papierinstruktion	währenddessen	
	nachher	
Blickpositionierungen (Gestensteuerung) HoloLens	währenddessen	
	nachher	

NASA-TLX

Kreuzen Sie bitte diejenige Stelle der Skala (0-100) an, die Ihrem Urteil zu der jeweiligen Dimension am besten entspricht.

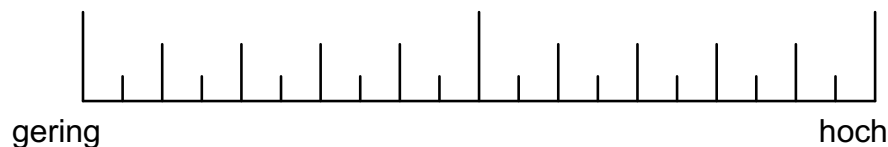
Geistige Anforderung

Wie viel geistige Anforderung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen)?
War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?



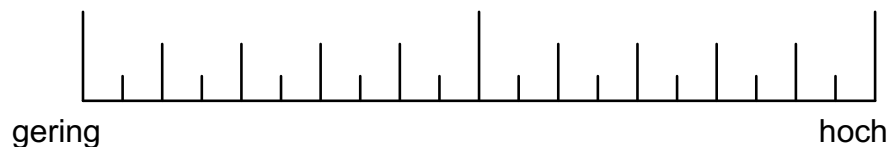
Körperliche bzw. physische Anforderung

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren)?
War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



Zeitliche Anforderung

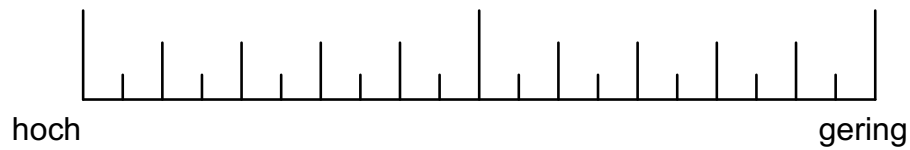
Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten?
War die Aufgabe langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?



Leistung

Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht?

Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?



Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?



Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (vs. sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?



Kreisen Sie bitte diejenige Dimension des Vergleichs ein, die den jeweils wichtigeren Beitrag zur Arbeitsbelastung hinsichtlich der Aufgabe darstellt.

Körperliche Anforderung - Zeitliche Anforderung	Zeitliche Anforderung - Geistige Anforderung	Anstrengung - Körperliche Anforderung
Leistung - Zeitliche Anforderung	Körperliche Anforderung - Frustration	Zeitliche Anforderung - Frustration
Anstrengung - Leistung	Leistung - Geistige Anforderung	Geistige Anforderung - Anstrengung
Geistige Anforderung - Körperliche Anforderung	Frustration - Anstrengung	Frustration - Geistige Anforderung
Leistung - Frustration	Zeitliche Anforderung - Anstrengung	Körperliche Anforderung - Leistung

Abb. C13: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo“) – Seite 13 von 20

VFQ

Kreuzen Sie bitte diejenige Stelle der Skala (0-100) an, die Ihrem Urteil zu dem jeweiligen Symptom am besten entspricht.

Trockene Augen



Tränende Augen



Gereizte oder brennende Augen



Schmerzen in oder um die Augen



Schwere Augen



Schwierigkeiten, Linien folgen zu können

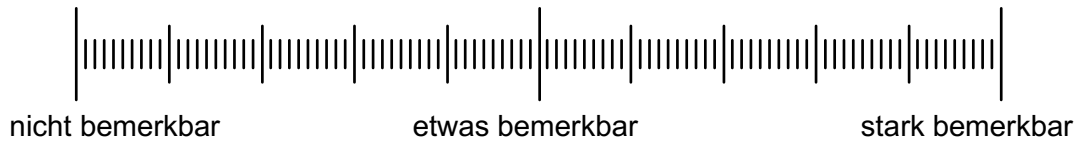


Abb. C14: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo“) – Seite 14 von 20

Schwierigkeiten, scharf zu sehen



Springender bzw. zitternder Text



Verschwommene Buchstaben



Blendung durch Lichter



Unschärfe bzw. verschwommene Sicht



Doppelsehen



Kopfschmerzen



Nackenschmerzen



Übelkeit



Geistige Ermüdung



Abschluss-befragung / Interview

Bitte markieren Sie, sofern möglich, einen Zahlenwert pro Fragestellung, der Ihre Einschätzung auf der Skala (-4 ... +4) widerspiegelt.

Wie beurteilen Sie die Versuchsaufgabe?




	  									
	sehr schlecht			neutral				sehr gut		
	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	
Papierinstruktion										
HoloLens										

Wie beurteilen Sie die Anzeigequalität der Instruktiondarstellungen?




	  									
	sehr schlecht			neutral				sehr gut		
	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	
Papierinstruktion										
HoloLens										

Abb. C17: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo“) – Seite 17 von 20




Wie beurteilen Sie die Trageigenschaften der HoloLens?

								
sehr schlecht		neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4




Wie beurteilen Sie das Versuchsdesign bzw. die Versuchsbedingungen?

								
sehr schlecht		neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4




Wie beurteilen Sie die Interaktion mit dem Unterstützungssystem?

								
sehr schlecht		neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4




Wie beurteilen Sie adäquate Anwendungs- bzw. Einstellmöglichkeiten des Systems für unterschiedliche Kenntnisstände?

									
sehr schlecht			neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	




Wie beurteilen Sie die Beeinflussung Ihres Sehvermögens durch die Nutzung der HoloLens?

									
sehr schlecht			neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	

Wie beurteilen Sie die Innovation des Systems?

									
sehr schlecht			neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	

Wie beurteilen Sie das Verbesserungspotenzial des Systems?

								
sehr schlecht			neutral			sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Welche weiteren Anregungen / Hinweise / Verbesserungsvorschläge haben Sie?



HoloErgo-2.0-Studie

-

Einwilligungs-erklä- rung

&

Fragebogen

Einwilligungserklärung zur Erhebung und Verarbeitung personenbezogener Daten im Rahmen der Studie „HoloErgo 2.0“

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

wir bedanken uns für das von Ihnen gezeigte Interesse an der Studienteilnahme. Im Folgenden werden Ihnen die Rahmenbedingungen und Inhalte dargestellt. Bei Fragen oder Unklarheiten wenden Sie sich bitte an die Versuchsleitung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Cyberrüsten 4.0“ wird ein cyber-physisches System entwickelt, das Maschineneinrichter beim Rüstvorgang einer Rotationszugbiegemaschine unterstützt. Nähere Informationen zu dem Projekt erhalten Sie bei der Studienleitung und/oder unter folgender Webadresse: <http://www.uni-siegen.de/start/news/forschungsnews/831426.html>

Mit Ihrer Einwilligung nehmen Sie im Zuge dieses Forschungsvorhabens an der experimentellen Studie „HoloErgo“ teil, in der die Anwendung der Augmented-Reality-Datenbrille „HoloLens“ der Firma Microsoft (<https://www.microsoft.com/de-de/hololens>) unter Nutzung einer Unterstützungssystematik zum Umrüsten einer Biegemaschine unter ergonomischen Gesichtspunkten untersucht wird. Wir hoffen auf Ihre Bereitschaft zur freiwilligen Teilnahme, die Sie zu jedem Zeitpunkt der Untersuchungen ohne Angabe von Gründen und ohne einen Nachteil widerrufen können.

Bitte erklären Sie, ob Sie zur freiwilligen Teilnahme an der Studie bereit sind:

ja nein

In der ca. fünfstündigen Studie werden die durchgeführten Untersuchungen u.a. per Video aufgezeichnet. Darüber hinaus werden Körperdaten über elektromyographische Messungen sowie über Wärmebildaufnahmen objektiv erfasst. Weiterhin werden subjektive Daten anhand von Fragebögen sowie mithilfe eines Interviews generiert. Die durch die Studie erzeugten Angaben bzw. erhobenen Daten werden für wissenschaftliche Zwecke anonymisiert gespeichert, im Rahmen der Forschungsarbeit analysiert und für Veröffentlichungen verwendet. Alle Angaben, die zu einer Identifizierung der Person führen könnten, werden verändert oder aus dem Text entfernt. Im Rahmen wissenschaftlicher Veröffentlichungen werden lediglich Ausschnitte der Untersuchung zitiert. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der entstehende Gesamtzusammenhang von Ereignissen nicht zu einer Personenidentifikation gegenüber Dritten führt.

Die Studienteilnahme erfolgt auf freiwilliger Basis. Sie haben zu jeder Zeit eine Widerrufsmöglichkeit hinsichtlich der aktuell geführten Untersuchung, der Durchführung weiterer Untersuchungen sowie Ihres Einverständnisses für sämtliche Aufzeichnungen und Niederschriften. Dadurch entstehen in keinsten Weise Nachteile für Sie. Bitte wenden Sie sich diesbezüglich an den zuständigen Studienleiter Herrn Nils Darwin Abele.

Ihre personenbezogenen Kontaktdaten werden von den Evaluierungsdaten getrennt bzw. verschlüsselt und am Lehrstuhl Arbeitswissenschaft/Ergonomie der Universität Siegen vom Lehrstuhlinhaber – Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Kluth – in einem verschlossenen Stahlschrank, getrennt von den Studienunterlagen (Versuchsergebnissen), über 10 Jahre sicher aufbewahrt und danach vernichtet. Im Falle eines Widerrufs meiner Erklärung können Sie entscheiden, ob die bereits vorliegenden Daten unverzüglich gelöscht werden müssen oder weiterverwendet werden dürfen. Die Daten sind für Dritte unzugänglich.

Sie wurden über die zu erwartenden physischen Belastungen und möglichen Risiken, wie z.B. allergische Reaktionen durch die aufgeklebten Elektroden oder muskuläre Verspannungen durch die Anwendung der HoloLens, im Rahmen dieser – an eine reale Arbeitsaufgabe angepasste – wissenschaftliche Untersuchung informiert.

Ihnen ist bekannt, dass die Universität Siegen keine Probandenversicherung für dieses Vorhaben abgeschlossen hat. Eine Haftung für Sach- und Personenschäden gegen die Universität und ihre Mitarbeiter ist ausgeschlossen, es sein denn, der entstandene Schaden beruht auf Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit.

Die vorstehenden Angaben haben Sie gelesen und verstanden. Sie stimmen der Teilnahme am Forschungsvorhaben zu und erklären sich mit Ihrer Unterschrift für die Erhebung und Verarbeitung Ihrer gemessenen Daten einschließlich der Daten hinsichtlich Alter, Gewicht, Körpergröße, Bild-, Ton- und Videoaufnahmen sowie bezüglich deren streng vertraulicher Nutzung für wissenschaftliche Zwecke durch das Studienteam einverstanden.

Siegen,

Ort, Datum

Vor- & Nachname

Unterschrift

Wir bedanken uns für Ihre Teilnahme und Bereitschaft zur Unterstützung des Forschungsvorhabens.

Allgemeine Daten

Proband-Nr. _____

Alter [Jahre] _____

Größe [cm] _____

Gewicht [kg] _____

Beruf _____

Körperliche Verfassung

Üben Sie eine sportliche Betätigung aus? ja nein

Wenn ja, welche Sportart üben Sie wie lange aus?

Sportart: _____ h / Woche: _____

Sportart: _____ h / Woche: _____

Sportart: _____ h / Woche: _____

Händigkeit rechts links

Sehhilfe ja (Brille) ja (Kontaktlinsen) nein

Wenn ja, welche Dioptrienzahl weist ihre Sehhilfe auf?

rechts _____

links _____

Welchen körperlichen Fitnesszustand weisen Sie derzeit auf?

sehr gut gut mittelmäßig schlecht sehr schlecht

Wie ernähren Sie sich?

sehr gesund gesund mittelmäßig ungesund sehr ungesund

Rauchen Sie? ja nein

Wenn ja, wie viele Zigaretten rauchen Sie pro Tag?

< 10 11-20 21-30 31-40 > 40

Konsumieren Sie alkoholische Getränke? ja nein

Wenn ja, wie häufig konsumieren Sie Alkohol pro Woche?

1-2x 3x 4x 5-6x täglich

Nehmen Sie derzeit Medikamente ein? ja nein

Wenn ja, welche Medikamente nehmen Sie wie oft ein?

Medikament: _____ Dosis: _____

Medikament: _____ Dosis: _____

Medikament: _____ Dosis: _____

Haben Sie innerhalb der letzten 48 Stunden bewusstseinsbeeinflussende Substanzen (Alkohol, Drogen, Medikamente etc.) zu sich genommen? ja nein

Bestehen bei Ihnen Vorerkrankungen oder gesundheitliche Beschwerden? ja nein

Wenn ja, welche Vorerkrankungen bzw. Beschwerden?

Befinden Sie sich zurzeit in ärztlicher Behandlung? ja nein

Wenn ja, weshalb: _____

Wann haben Sie zuletzt einen Arzttermin aus welchem Grund wahrgenommen?

Zeitpunkt: _____

Grund: _____

Sind Sie momentan emotional abgelenkt? ja nein

Wenn ja, warum? _____

Sind Sie grundsätzlich leicht von einer Aufgabe abzulenken? ja nein

Vorerfahrung

Geben Sie nachfolgend Ihre Vorerfahrung mit den angegebenen Technologien an.

Computer / Notebook		h / Woche
Tablet		h / Woche
Smartphone		h / Woche
Fernsehen		h / Woche

Haben Sie bereits Erfahrungen mit Datenbrillen bzw. Head-Mounted Displays sammeln können? ja nein

Wenn ja, was haben Sie wie häufig und in welchem Kontext angewendet?

Gerät(e) _____

h / Woche _____

Zweck _____

Nutzen Sie Datenbrillen bzw. Head-Mounted Displays regelmäßig? ja nein

Wenn ja, was nutzen Sie wie häufig und in welchem Kontext?

Gerät(e) _____

h / Woche _____

Zweck _____

Haben Sie jemals einen Rüstprozess durchgeführt? ja nein

Wenn ja, was haben Sie vor welcher Zeit gerüstet?

Rüstvorgang _____

Zeitpunkt _____



Technikaffinität

Einstellung zu und Umgang mit elektronischen Geräten (TA-EG)

Vielen Dank, dass Sie an dieser Befragung teilnehmen. Üblicherweise dauert es nicht länger als 5-10 Minuten, den Fragebogen auszufüllen.

Der Fragebogen befasst sich mit Ihrer persönlichen Meinung zu verschiedenen Aspekten elektronischer Geräte sowie mit der Erfahrung, die Sie im Umgang mit diesen Geräten haben.

Unter dem Begriff „elektronische Geräte“ verstehen wir Geräte, wie z.B.:

- Computer, Smartphones, Digitalkameras, DVD-Player etc.
- Geldautomaten, Ticketautomaten
- Neue elektronische Systeme im Auto (Navigationssysteme etc.)

Nicht gemeint sind:

- Werkzeug (Bohrmaschine, Kreissäge, Hammer, Rasenmäher etc.)
- Haushaltsgeräte (Toaster, Handrührgerät, Wasserkocher etc.)
- Fahrzeuge und Fahrzeugmotoren

Ihre Angaben werden selbstverständlich vertraulich behandelt und lediglich zu Forschungszwecken verwendet. Da die Befragung anonym erfolgt, sind keine Rückschlüsse auf Ihre Person möglich.

Quelle:

Karrer, K., Glaser, C., Clemens, C. & Bruder, C. (2009). Technikaffinität erfassen – der Fragebogen TA-EG. In A. Lichtenstein, C. Stößel und C. Clemens (Hrsg.), *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme*. 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme (ZMMS Spektrum, Reihe 22, Nr. 29, S. 196-201). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

Der nachfolgenden Tabelle entnehmen Sie eine Reihe von Aussagen. Bitte geben Sie für jede der Aussagen an, wie gut diese auf Sie persönlich zutrifft. Kreuzen Sie dazu auf der rechten Seite das Feld, das Ihrer Meinung am besten entspricht.

	Trifft voll zu	Trifft eher zu	Teils /teils	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
1. Ich liebe es, neue elektronische Geräte zu besitzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Elektronische Geräte machen krank.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Ich gehe gern in den Fachhandel für elektronische Geräte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Ich habe bzw. hätte Verständnisprobleme beim Lesen von Elektronik- und Computerzeitschriften.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Elektronische Geräte ermöglichen einen hohen Lebensstandard.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Elektronische Geräte führen zu geistiger Verarmung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Elektronische Geräte machen vieles umständlicher.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Ich informiere mich über elektronische Geräte, auch wenn ich keine Kaufabsicht habe.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Elektronische Geräte machen unabhängig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Es macht mir Spaß, ein elektronisches Gerät auszuprobieren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Elektronische Geräte erleichtern mir den Alltag.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. Elektronische Geräte erhöhen die Sicherheit.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Elektronische Geräte verringern den persönlichen Kontakt zwischen den Menschen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Ich kenne die meisten Funktionen der elektronischen Geräte, die ich besitze.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15. Ich bin begeistert, wenn ein neues elektronisches Gerät auf den Markt kommt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16. Elektronische Geräte verursachen Stress.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17. Ich kenne mich im Bereich elektronischer Geräte aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18. Es fällt mir leicht, die Bedienung eines elektronischen Geräts zu lernen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19. Elektronische Geräte helfen, an Informationen zu gelangen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. C29: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo 2.0“) – Seite 9 von 23

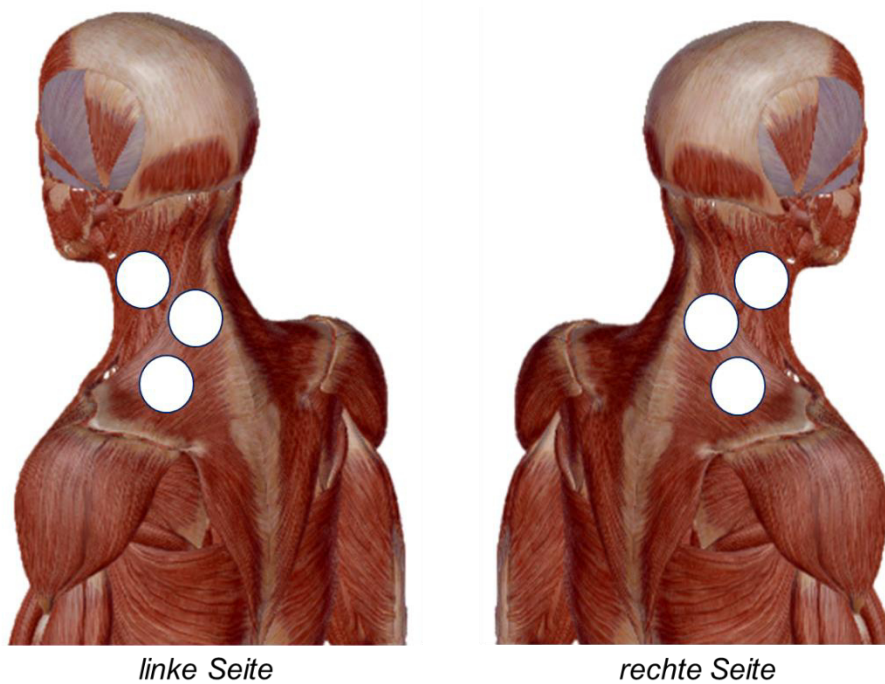
Physiologie

Wie beurteilen Sie Ihre aktuell **empfundene muskuläre Beanspruchung** in den nachfolgenden Körperbereichen im Anschluss an die Arbeitsaufgabe?

Die Beurteilungsziffer ...

- 0 (keine Beanspruchung),
- 1 (moderate Beanspruchung),
- 2 (starke Beanspruchung),
- 3 (sehr starke Beanspruchung) oder
- 4 (unerträglich starke Beanspruchung)

tragen Sie bitte in die entsprechenden Bereiche ein.



Wie beurteilen Sie Ihre aktuelle persönliche **Komfortempfindung** in den nachfolgenden Kopfbereichen im Anschluss an die Arbeitsaufgabe?

Die Beurteilungsziffer ...

- 0 (keine Beanspruchung),
- 1 (moderate Beanspruchung),
- 2 (starke Beanspruchung),
- 3 (sehr starke Beanspruchung) oder
- 4 (unerträglich starke Beanspruchung)

tragen Sie bitte in die entsprechenden Kästen ein.

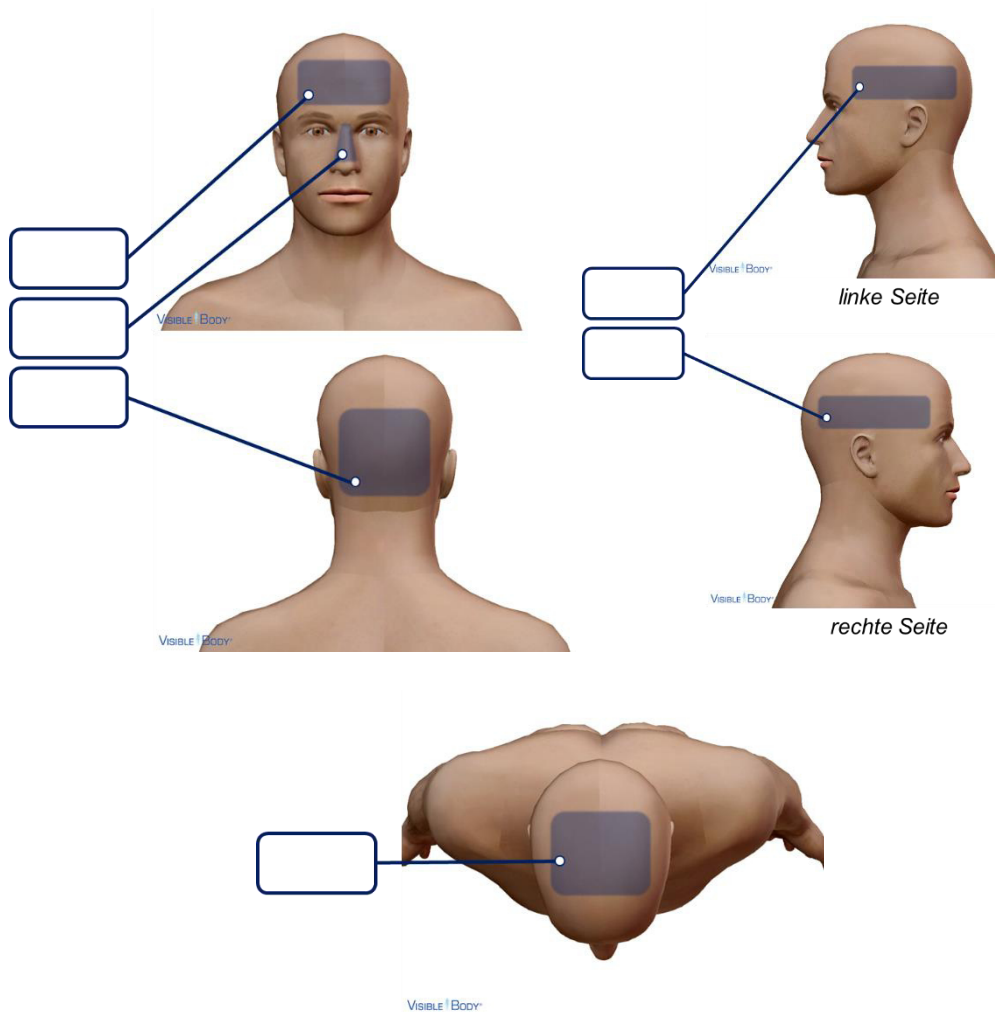
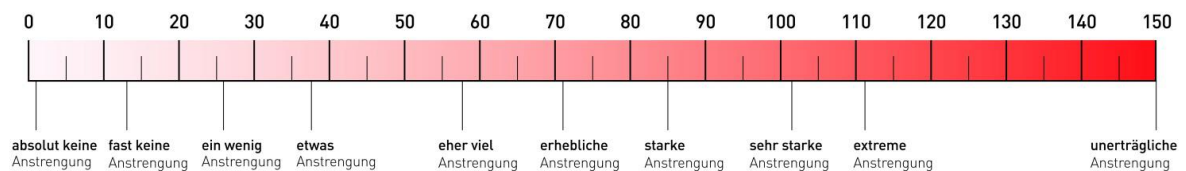


Abb. C31: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo 2.0“) – Seite 11 von 23

RSME

Beispielwerte zur Einordnung der Skala

Zweistündige Shoppingtour am Samstagvormittag in der Innenstadt	
Fernsehabend mit dem Partner oder Freunden	
Aufblasen von 50 Luftballons für eine Geburtstagsfeier	
Puzzle mit 500 Teilen	
Korrekturlesen eines 30-seitigen- Berichts am PC-Monitor	
Vierständiger Kinobesuch von „Ben Hur“	
Beantwortung der hier aufgeführten Beispielsituationen	



RSME-Werte während und nach der Versuchsdurchführung

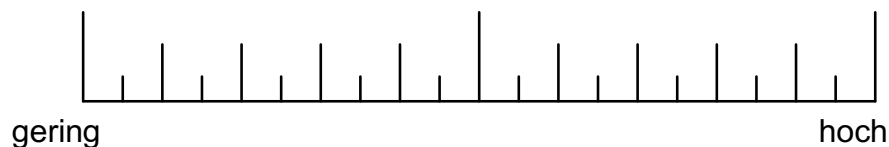
Papierinstruktion (#1)	währenddessen	
	nachher	
HoloLens im fixierten Fenstermodus (#1)	währenddessen	
	nachher	
HoloLens im variablen Fenstermodus (#1)	währenddessen	
	nachher	
Papierinstruktion (#2)	währenddessen	
	nachher	
HoloLens im fixierten Fenstermodus (#2)	währenddessen	
	nachher	
HoloLens im variablen Fenstermodus (#2)	währenddessen	
	nachher	

NASA-TLX

Kreuzen Sie bitte diejenige Stelle der Skala (0-100) an, die Ihrem Urteil zu der jeweiligen Dimension am besten entspricht.

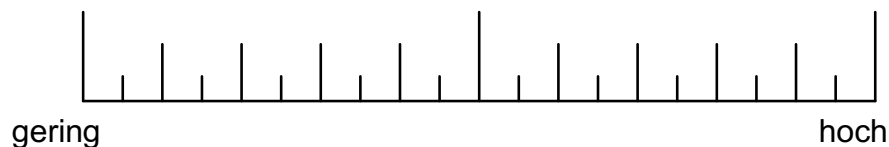
Geistige Anforderung

Wie viel geistige Anforderung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen)?
War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?



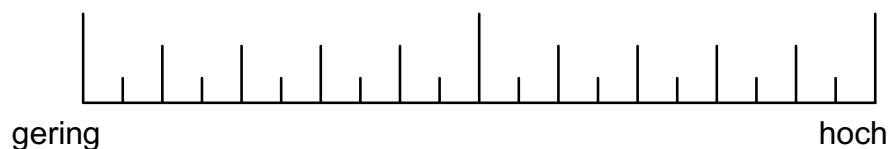
Körperliche bzw. physische Anforderung

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren)?
War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



Zeitliche Anforderung

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten?
War die Aufgabe langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?



Leistung

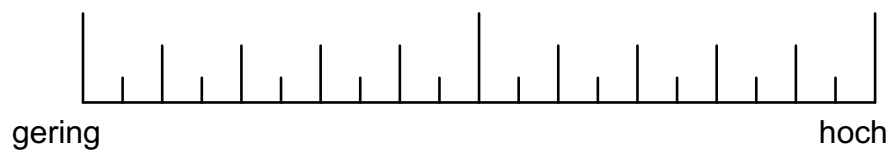
Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht?

Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?



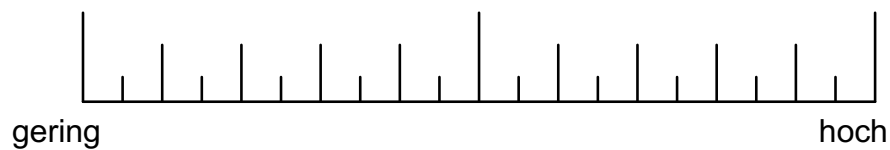
Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?



Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (vs. sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?



Kreisen Sie bitte diejenige Dimension des Vergleichs ein, die den jeweils wichtigeren Beitrag zur Arbeitsbelastung hinsichtlich der Aufgabe darstellt.

Körperliche Anforderung - Zeitliche Anforderung	Zeitliche Anforderung - Geistige Anforderung	Anstrengung - Körperliche Anforderung
Leistung - Zeitliche Anforderung	Körperliche Anforderung - Frustration	Zeitliche Anforderung - Frustration
Anstrengung - Leistung	Leistung - Geistige Anforderung	Geistige Anforderung - Anstrengung
Geistige Anforderung - Körperliche Anforderung	Frustration - Anstrengung	Frustration - Geistige Anforderung
Leistung - Frustration	Zeitliche Anforderung - Anstrengung	Körperliche Anforderung - Leistung

VFQ

Kreuzen Sie bitte diejenige Stelle der Skala (0-100) an, die Ihrem Urteil zu dem jeweiligen Symptom am besten entspricht.

Trockene Augen



Tränende Augen



Gereizte oder brennende Augen



Schmerzen in oder um die Augen



Schwere Augen



Schwierigkeiten, Linien folgen zu können



Abb. C36: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo 2.0“) – Seite 16 von 23

Schwierigkeiten, scharf zu sehen



Springender bzw. zitternder Text



Verschwommene Buchstaben



Blendung durch Lichter



Unschärfe bzw. verschwommene Sicht



Doppelsehen



Kopfschmerzen



Nackenschmerzen



Übelkeit






Geistige Ermüdung






Abschluss-befragung / Interview

Bitte markieren Sie, sofern möglich, einen Zahlenwert pro Fragestellung, der Ihre Einschätzung auf der Skala (-4 ... +4) widerspiegelt.




Wie beurteilen Sie die Versuchsaufgabe?

	  									
	sehr schlecht				neutral		sehr gut			
	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	
Papierinstruktion										
HoloLens (fix. Modus)										
HoloLens (var. Modus)										




Wie beurteilen Sie die Anzeigequalität der Instruktiondarstellungen?

	  									
	sehr schlecht				neutral		sehr gut			
	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	
Papierinstruktion										
HoloLens (fix. Modus)										
HoloLens (var. Modus)										

Wie beurteilen Sie die Trageigenschaften der HoloLens?

								
sehr schlecht		neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Wie beurteilen Sie das Versuchsdesign bzw. die Versuchsbedingungen?

								
sehr schlecht		neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Wie beurteilen Sie die Interaktion mit dem Unterstützungssystem?










								
sehr schlecht		neutral				sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Abb. C40: Fragebogen zur Erhebung personenbezogener Daten und der subjektiven Wahrnehmung (Teilstudie „HoloErgo 2.0“) – Seite 20 von 23




Wie beurteilen Sie adäquate Anwendungs- bzw. Einstellmöglichkeiten des Systems für unterschiedliche Kenntnisstände?

								
sehr schlecht		neutral			sehr gut			
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4




Wie beurteilen Sie die Beeinflussung Ihres Sehvermögens durch die Nutzung der HoloLens?

								
sehr schlecht		neutral			sehr gut			
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Wie beurteilen Sie die Innovation des Systems?

								
sehr schlecht		neutral			sehr gut			
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Wie beurteilen Sie das Verbesserungspotenzial des Systems?

								
sehr schlecht			neutral			sehr gut		
-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Inwiefern können Sie sich vorstellen mit dem System zu arbeiten?

Inwiefern beeinflussen die unterschiedlichen Anwendungen ihre Performance?

Welche Schwierigkeiten sind Ihnen beim Umgang mit dem HMD begegnet?

Inwieweit hat sich Ihr Umgang mit dem System im zeitlichen Verlauf der Studie verändert?

Inwiefern spielen dabei aus Ihrer Sicht Pausen eine Rolle?

Inwieweit hat sich Ihre Wahrnehmung mit dem System im zeitlichen Verlauf der Studie verändert?

Welche Ausführung (mit/ohne HoloLens) hat Ihnen besser gefallen? Warum?

Welche Strategien haben Sie bei den Ausführungen jeweils verfolgt?

Welche Verbesserungsaspekte gibt es ...

... hinsichtlich des Versuchsdesigns?

... hinsichtlich der Applikation?

... hinsichtlich des Endgeräts?

Warum würden Sie das System für einen kurzzeitigen oder langzeitigen Gebrauch empfehlen?

Welche weiteren Einsatzgebiete können Sie sich für eine derartige Datenbrille vorstellen?

Was müsste gegeben sein, damit Sie den Versuch erneut durchführen würden?

Welche weiteren Anregungen oder Hinweise haben Sie?

Tab. D1: Auszug der t-Verteilung zur statistischen Sicherheit $1-\alpha$ in Abhängigkeit der verschiedenen Signifikanzniveaus und Freiheitsgrade (SACHS, 1974)

f	Statistische Sicherheit $1-\alpha$			
	0,9	0,95	0,99	0,999
1	6,314	12,710	63,657	636,620
2	2,920	4,303	9,925	31,599
3	2,353	3,182	5,841	12,924
4	2,132	2,776	4,604	8,610
5	2,015	2,571	4,032	6,869
6	1,943	2,447	3,707	5,959
7	1,895	2,365	3,499	5,408
8	1,860	2,306	3,355	5,041
9	1,833	2,262	3,250	4,781
10	1,812	2,228	3,169	4,587
11	1,796	2,201	3,106	4,437
12	1,782	2,179	3,055	4,318
13	1,771	2,160	3,012	4,221
14	1,761	2,145	2,977	4,141
15	1,753	2,131	2,947	4,073
16	1,746	2,120	2,921	4,015
17	1,740	2,110	2,898	3,965
18	1,734	2,101	2,878	3,992
19	1,729	2,093	2,861	3,883
20	1,725	2,086	2,845	3,850
21	1,721	2,080	2,831	3,819
22	1,717	2,074	2,819	3,792
23	1,714	2,069	2,807	3,768
24	1,711	2,064	2,797	3,745
25	1,708	2,060	2,787	3,725
26	1,706	2,056	2,779	3,707
27	1,703	2,052	2,771	3,690
28	1,701	2,048	2,763	3,674
29	1,699	2,045	2,756	3,659
30	1,697	2,042	2,750	3,646

Tab. D2: Auszug der Tabelle der kritischen Werte für den Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (CLAUS & EBNER, 1972)

n	Signifikanzniveau α			
	0,1	0,05	0,01	0,001
11	13	11	5	0
12	17	14	7	1
13	21	17	10	2
14	25	21	13	4
15	30	25	16	6
16	35	30	20	8
17	41	35	23	11
18	47	40	28	14
19	53	46	32	18
20	60	52	38	21
21	67	59	43	25
22	75	66	49	30
23	83	73	55	35
24	91	81	61	40
25	100	89	68	45
26	110	98	75	51
27	119	107	83	57
28	130	116	91	64
29	140	126	100	71
30	151	137	109	78

Tab. D3: Auszug der Standardnormalverteilung (z-Verteilung) mitsamt der gelb markierten Konfidenzniveaus (FISHER & YATES, 1974)

z-Wert	Zweite Dezimalstelle des z-Wertes									
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
1,50	0,1336	0,1310	0,1286	0,1260	0,1236	0,1212	0,1188	0,1164	0,1142	0,1118
1,60	0,1096	0,1074	0,1052	0,1032	0,1010	0,0990	0,0970	0,0950	0,0930	0,0910
1,70	0,0892	0,0872	0,0854	0,0836	0,0818	0,0802	0,0784	0,0768	0,0750	0,0734
1,80	0,0718	0,0702	0,0688	0,0672	0,0658	0,0644	0,0628	0,0614	0,0602	0,0588
1,90	0,0574	0,0562	0,0548	0,0536	0,0524	0,0512	0,0500	0,0488	0,0478	0,0466
2,00	0,0456	0,0444	0,0434	0,0424	0,0414	0,0404	0,0394	0,0384	0,0376	0,0366
2,10	0,0358	0,0348	0,0340	0,0332	0,0324	0,0316	0,0308	0,0300	0,0292	0,0286
2,20	0,0278	0,0272	0,0264	0,0258	0,0250	0,0244	0,0238	0,0232	0,0226	0,0220
2,30	0,0214	0,0208	0,0204	0,0198	0,0192	0,0188	0,0182	0,0178	0,0174	0,0168
2,40	0,0164	0,0160	0,0156	0,0150	0,0146	0,0142	0,0138	0,0136	0,0132	0,0128
2,50	0,0124	0,0120	0,0118	0,0114	0,1100	0,0108	0,0104	0,0102	0,0098	0,0096
2,60	0,0094	0,0090	0,0088	0,0086	0,0082	0,0080	0,0078	0,0076	0,0074	0,0072
2,70	0,0070	0,0068	0,0066	0,0064	0,0062	0,0060	0,0580	0,0056	0,0054	0,0052
2,80	0,0052	0,0050	0,0048	0,0046	0,0046	0,0044	0,0042	0,0042	0,0040	0,0038
2,90	0,0038	0,0036	0,0036	0,0032	0,0032	0,0032	0,0030	0,0030	0,0028	0,0028

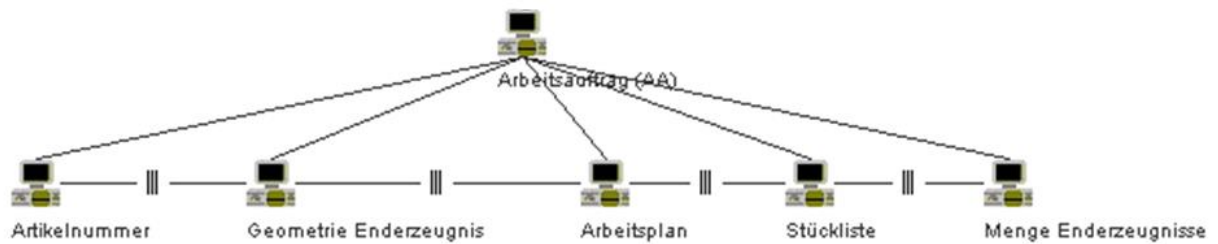


Abb. E1: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Arbeitsauftrag

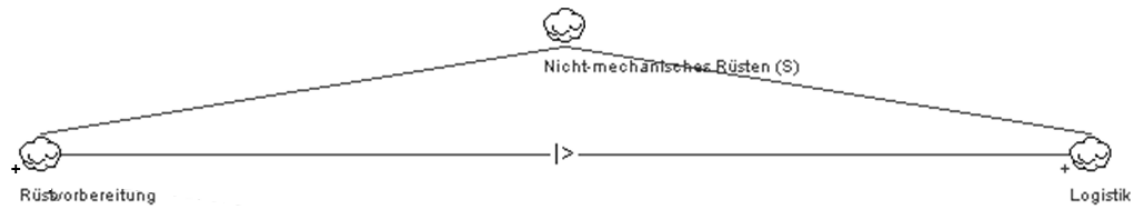


Abb. E2: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Nicht-mechanisches Rüsten

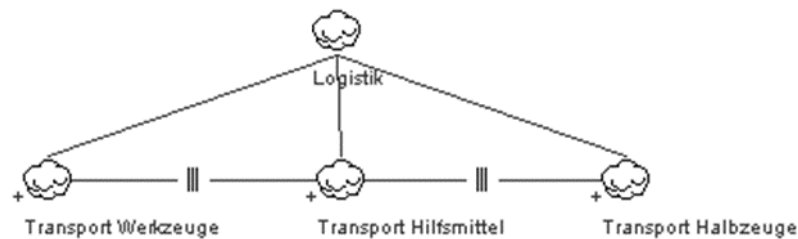


Abb. E3: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Logistik

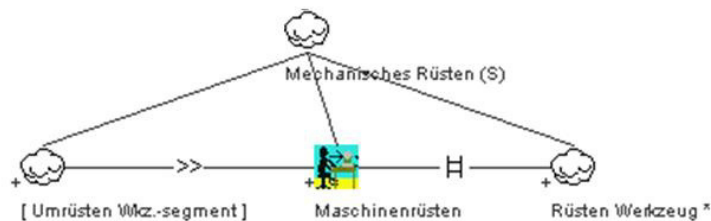


Abb. E4: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Mechanisches Rüsten

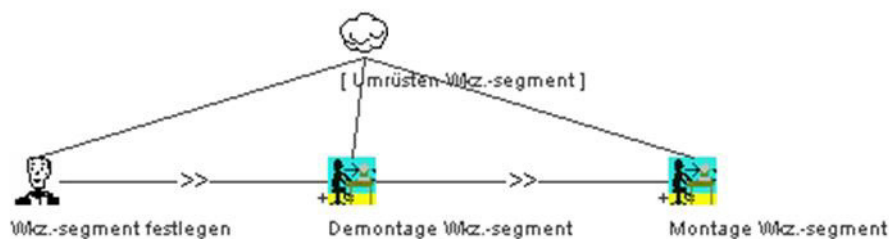


Abb. E5: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Umrüsten der Werkzeugsegmente

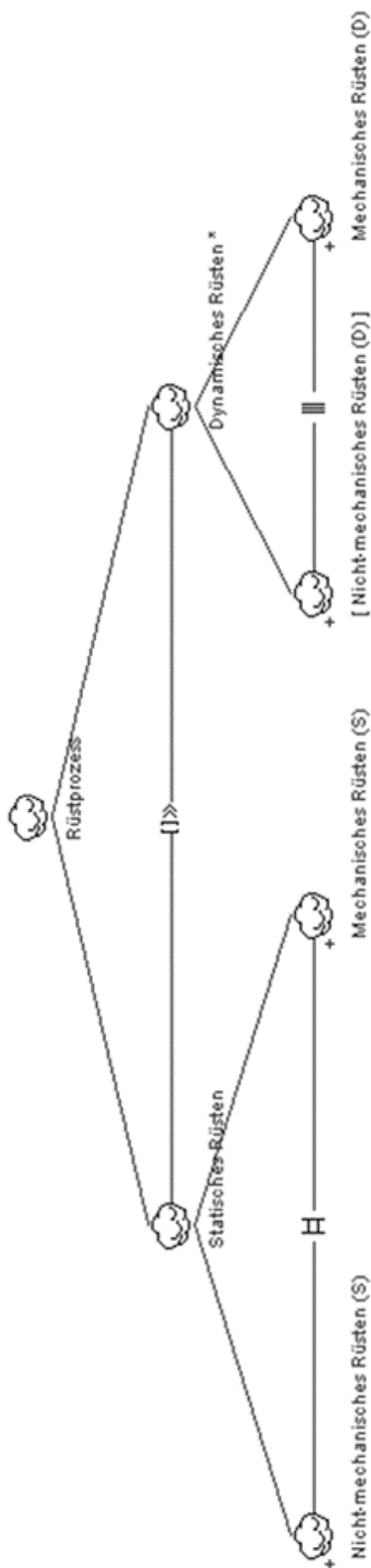


Abb. E6: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Rüstprozess

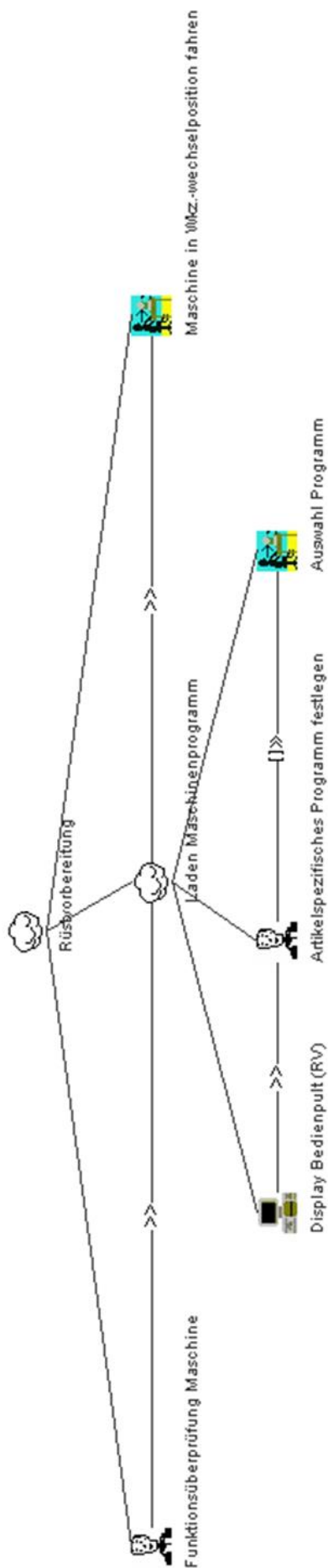


Abb. E7: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Rüstvorbereitung

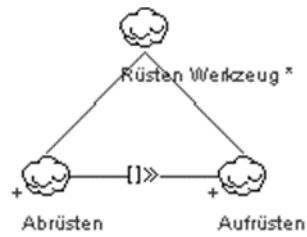


Abb. E8: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Rüsten der Werkzeuge

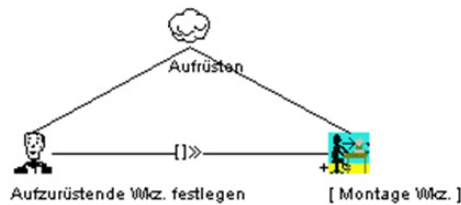


Abb. E9: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Aufrüsten

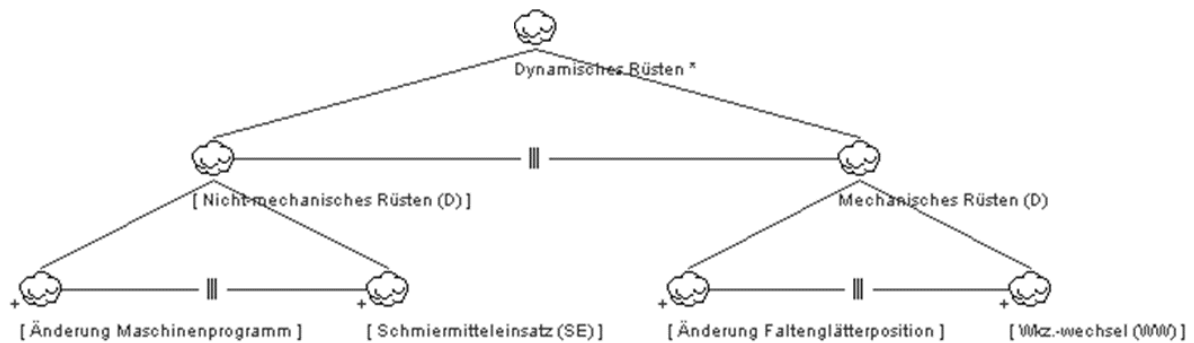


Abb. E10: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Dynamisches Rüsten



Abb. E11: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Änderungen im Maschinenprogramm

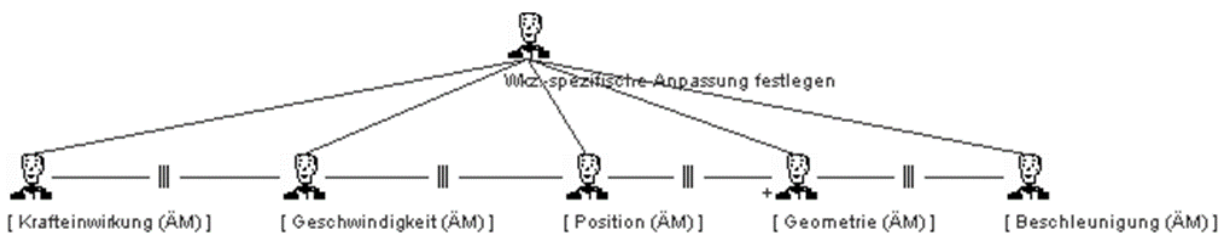


Abb. E12: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Festlegung der werkzeugspezifischen Anpassungen

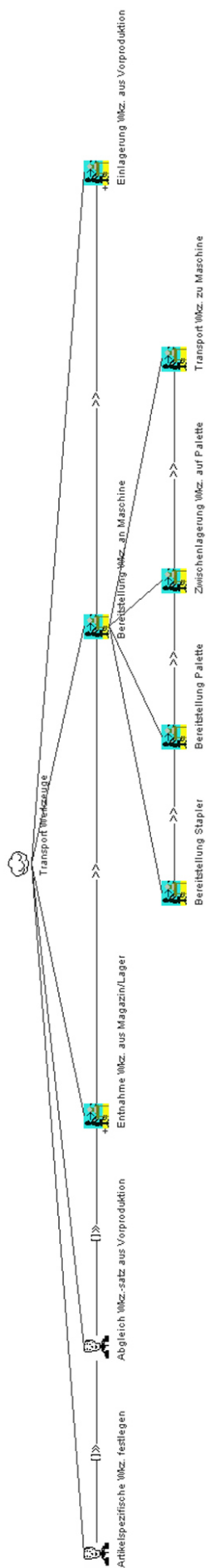


Abb. E13: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Werkzeug-Transport

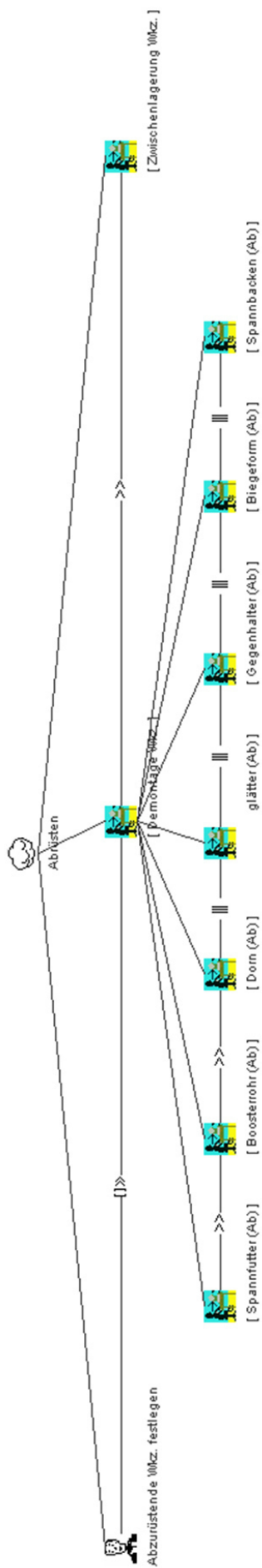


Abb. E14: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Abrüsten

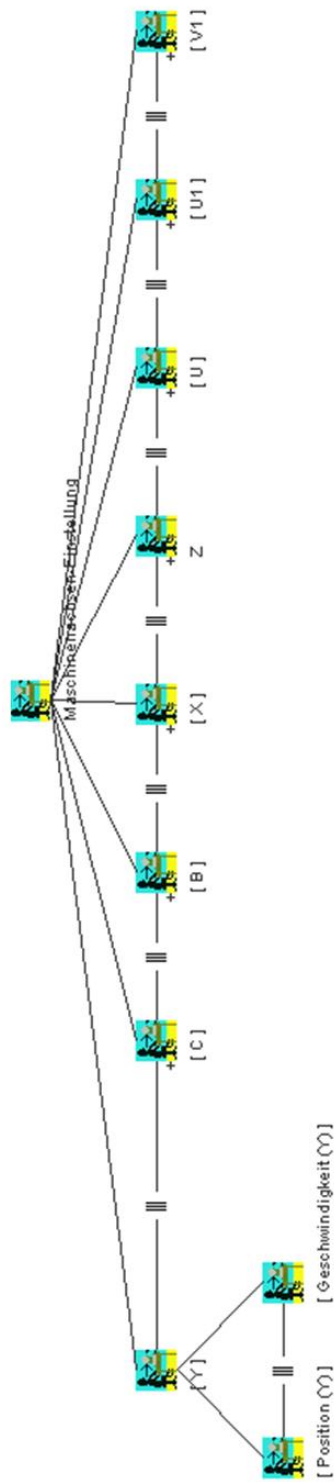


Abb. E15: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Einstellung der Maschinenachsen

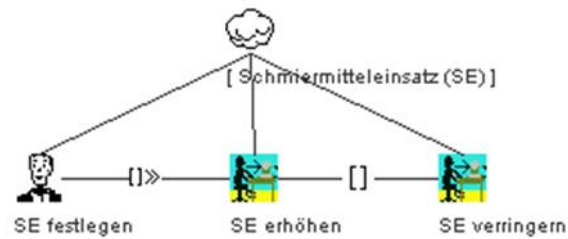


Abb. E16: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Schmiermitteleinsatz

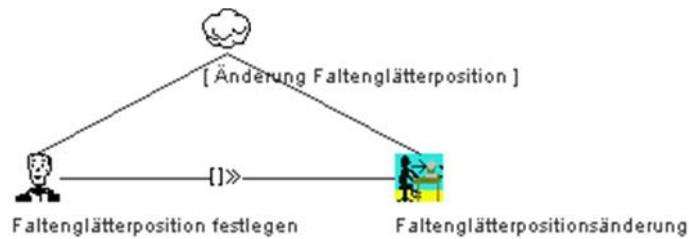


Abb. E17: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Änderung der Faltenglätterposition

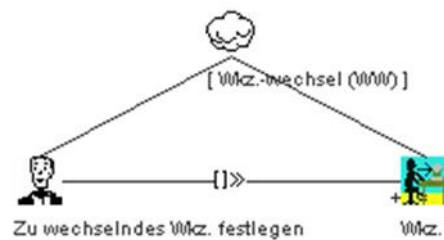


Abb. E18: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Werkzeugwechsel



Abb. E19: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Herstellungsprozess

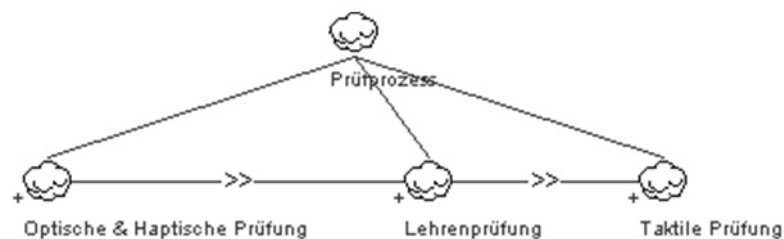


Abb. E20: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Prüfprozess

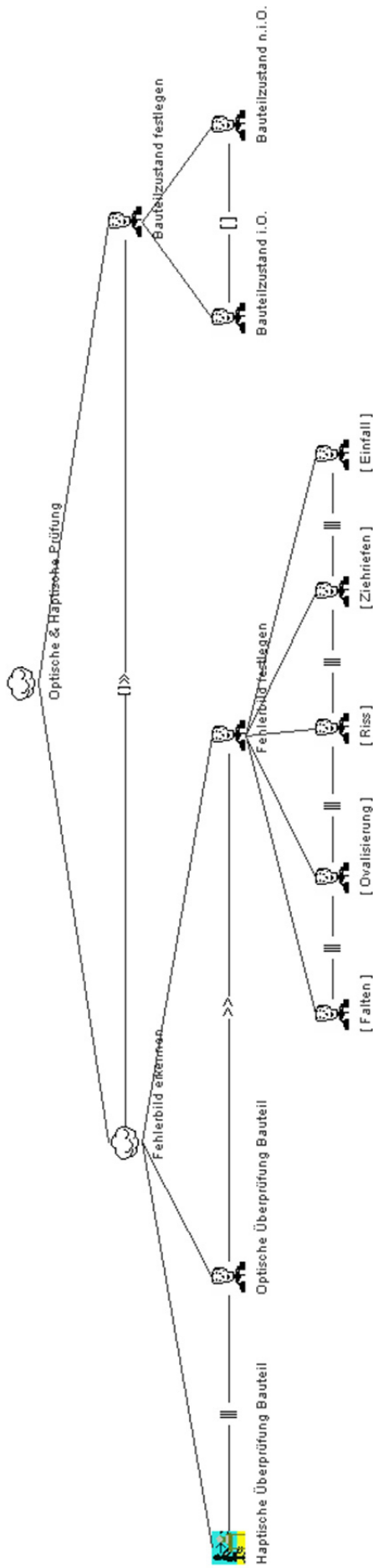


Abb. E21: Detailsicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Optische und haptische Prüfung

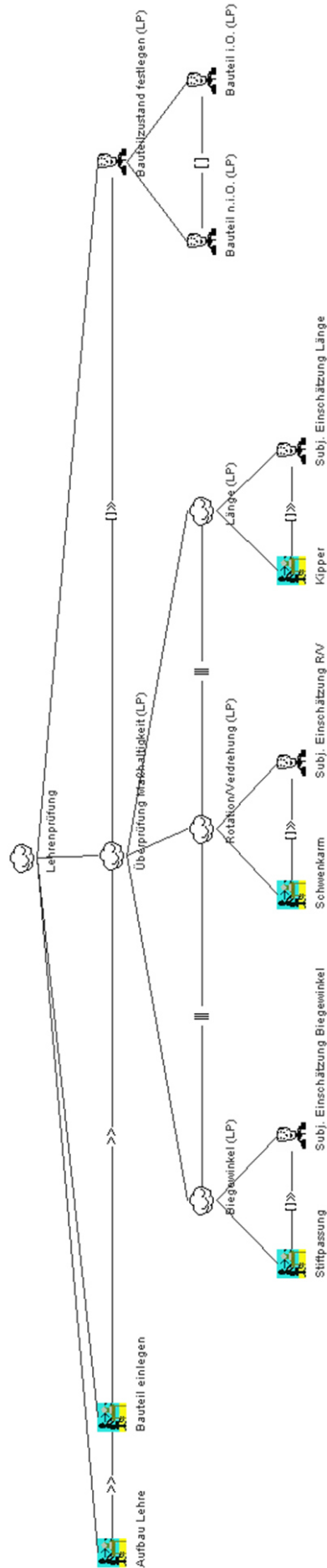


Abb. E22: Detailsicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNO, 2005) – Lehrenprüfung

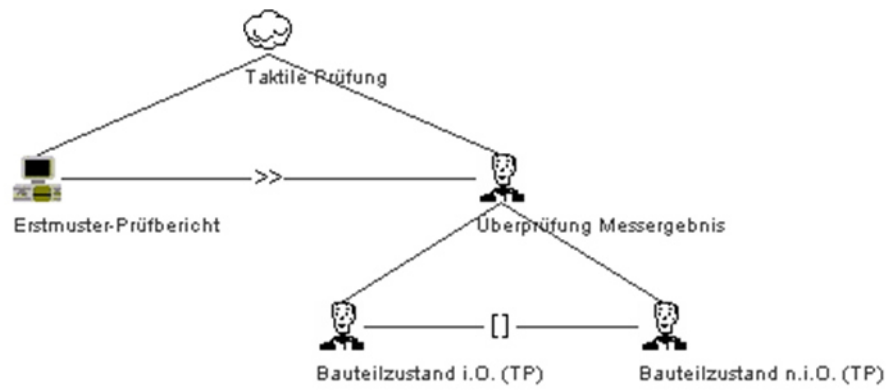


Abb. E23: Detailansicht des Aufgabenmodells mithilfe der CTT-Notation (Original-Darstellung, vgl. PATERNÒ, 2005) – Taktile Prüfung

Erweiterte Leitmerkmalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen (LMM-MA-E)

Arbeitsplatz / Teil-Tätigkeit:	Rüstprozess "Wafios RBV35" - Papierinstruktion		
Zeitdauer des Arbeitstages:	8h	Beurteiler:	N.D. Abele
Zeitdauer der Teil-Tätigkeit:	54 Minuten	Datum:	

1. Schritt: Bestimmung der Zeitwichtung 54 Minuten Interpolation: Zeitdauer

0.9	Gesamtdauer dieser Teil-Tätigkeit pro Arbeitstag [bis ... Stunden]	bis 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Zeitwichtung:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

2. Schritt: Bestimmung der Wichtungen der weiteren Merkmale

10

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Handbereich in einer „Norm-Minute“		Halten¹⁾			Bewegen				
		mittl. Haltedauer [Sek. pro Minute]			mittl. Bewegungshäufigkeiten [Anzahl pro Minute]				
		31-60	16-30	≤15	<5	5-15	16-30	31-60	61-90 ³⁾
		Wichtung			Wichtung				
Höhe	Beschreibung, typische Beispiele	5,5	3	1,5	0,5	1	2,5	5	7
gering	Sehr geringe / geringe Kräfte (bis 15 % F _{maxM}) z. B. Tastenbedienung / Verschieben / Ordnen / Materialführung / Einlegen von kleinen Teilen				0,5				
	Mittlere Kräfte (bis 30 % F _{maxM}) z. B. Greifen / Fügen von kleinen Werkstücken mit der Hand oder kleinen Werkzeugen	9	4,5	2,5	0,5	2	4	7,5	11
	Hohe Kräfte (bis 50 % F _{maxM}) z. B. Drehen / Wickeln / Verpacken / Fassen / Halten oder Fügen von Teilen / Eindrücken / Schneiden / Arbeiten mit kleineren angetriebenen Handwerkzeugen	14	7	3,5	1	3	6	12	18
	Sehr hohe Kräfte (bis 80 % F _{maxM}) z. B. kraftbetontes Schneiden / Arbeit mit kleinen Tackern / Bewegen oder Halten von Teilen oder Werkzeugen	22	11	5,5	1,5	5	10	19	
	Spitzenkräfte²⁾ (über 80 % F _{maxM}) z. B. Schrauben anziehen, lösen / Trennen / Eindrücken								
	Kräftiges Schlagen²⁾ mit Daumenballen, Handfläche oder Faust								
Der Arbeitszyklus ist zu beobachten und die Wichtungen für die Kraftkategorien zu markieren. Addiert (linke und rechte Hand getrennt) ergeben diese die Kraftwichtung. Für die Errechnung der Gesamtpunktzahl (Schritt 3) ist der höhere Wert zu verwenden.		Wichtungen der Kraftausübungen:			Linke Hand	Rechte Hand			
					1	10			

¹⁾ Als Haltearbeit werden nur dann Zeiteile berücksichtigt, wenn ein Arm mindestens 4 Sekunden durchgehend statisch gehalten wird!
²⁾ Achtung: Sofern eine dieser Kategorien gewählt wurde, wird empfohlen, diese Teil-Tätigkeit auch mit der LMM-GK bzw. LMM-GK-E zu bewerten! Ggf. können diese Kräfte gar nicht oder nicht mehr sicher aufgebracht werden. Dies gilt insbesondere für Frauen.
³⁾ Bei noch höheren Häufigkeiten ist die Merkmalswichtung zu extrapolieren (mit hinterlegtem Algorithmus).

1.5

Kraftübertragung / Greifbedingungen		Eigene Interpolation: <input checked="" type="checkbox"/>	Wichtung
Optimale Kraftübertragung/-einleitung / Arbeitsgegenstände gut greifbar (z. B. Stabform, Griffmulden) / gute ergonomische Griffgestaltung (Griffe, Tasten, Werkzeuge)			0
Eingeschränkte Kraftübertragung/-einleitung / erhöhte Haltekräfte erforderlich / keine gestalteten Griffe			2
Kraftübertragung/-einleitung erheblich behindert / Arbeitsgegenstände kaum greifbar (schmierig, weich, scharfkantig) / keine oder ungeeignete Griffe			4

0

Hand-/Armstellung und -bewegung⁴⁾		Eigene Interpolation:	Wichtung
	Gut: Stellung oder Bewegungen der Gelenke im mittleren (entspannten) Bereich, nur selten Abweichungen / keine andauernde statische Armhaltung / Hand-Arm-Auflage bei Bedarf möglich		0 <input checked="" type="checkbox"/>
	Eingeschränkt: Gelegentliche Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / gelegentlich lange andauernde statische Armhaltung		1
	Ungünstig: Häufige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / häufig lange andauernde statische Armhaltung		2
	Schlecht: Ständige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / ständig lange andauernde statische Armhaltung		3





⁴⁾ Es sind die typischen Stellungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.

0

Ungünstige Ausführungsbedingungen (nur angeben, wenn zutreffend)		Eigene Interpolation:	Wichtung
Gut: Es liegen keine ungünstigen Ausführungsbedingungen vor, d. h. sichere Detaillierkennbarkeit / keine Blendung / gute klimatische Bedingungen			0 <input checked="" type="checkbox"/>
Eingeschränkt: Gelegentlich erschwerte Detaillierkennbarkeit durch Blendung oder zu kleine Details Erschwerende Bedingungen wie Zugluft, Kälte, Nässe und/oder Konzentrationsstörungen durch Geräusche			1
Ungünstig: Häufige erschwerte Detaillierkennbarkeit durch Blendung oder zu kleine Details Häufig erschwerende Bedingungen wie Zugluft, Kälte, Nässe und/oder Konzentrationsstörungen durch Geräusche			2

In der Tabelle nicht genannte Merkmale sind sinngemäß zu berücksichtigen.

Abb. E24: LMM zur Beurteilung und Gestaltung bei manuellen Arbeitsprozessen – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion – Seite 1 von 2

Körperhaltung/-bewegung ^{5) 6)}		Eigene Interpolation: <input checked="" type="checkbox"/>	Wichtung
	<ul style="list-style-type: none"> * Wechsel von Sitzen und Stehen, Wechsel von Stehen und Gehen, dynamisches Sitzen möglich - Rumpf maximal sehr leicht vorgeeigt - keine Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar * Kopfhaltung: variabel, kein Rückwärts- und / oder starkes Vorneigen bzw. dauernde Drehung * kein Greifen über Schulterhöhe/ kein körperfernes Greifen 		0
	<ul style="list-style-type: none"> - überwiegend Sitzen oder Stehen mit gelegentlichem Gehen * Rumpf mit leichter Neigung des Körpers zum Handlungsbereich * gelegentliche Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar * gelegentliche Abweichungen von einer guten „neutralen“ Kopfhaltung/ -bewegung - gelegentliches Greifen über Schulterhöhe / gelegentliches körperfernes Greifen 		2
	<ul style="list-style-type: none"> - ausschließlich Stehen oder Sitzen ohne Gehen * Rumpf deutlich vorgeeigt und/oder häufige Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar - häufige Abweichungen von einer guten „neutralen“ Kopfhaltung/ -bewegung - Kopfhaltung zur Detailerkennung vorgegeben / eingeschränkte Bewegungsfreiheit - häufiges Greifen über Schulterhöhe / häufiges körperfernes Greifen 		4
	<ul style="list-style-type: none"> - Rumpf stärker vorgeeigt / häufiges oder langandauerndes Bücken - Arbeiten im Knien, Hocken, Liegen - ständige Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar - streng fixierte Körperhaltung / visuelle Kontrolle der Handlung über Lupen oder Mikroskope - ständige Abweichungen von einer guten „neutralen“ Kopfhaltung/ -bewegung - ständiges Greifen über Schulterhöhe / ständiges körperfernes Greifen 		6 ⁷⁾

1.5


⁵⁾ Es sind die typischen Körperhaltungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.
⁶⁾ Werden die manuellen Arbeitsprozesse nicht stationär im Sitzen, Stehen, Knien, Hocken, Liegen ausgeführt, sondern in der Bewegung (Gehen, Kriechen), wird empfohlen, die Teil-Tätigkeit auch mit der LMM-KB bzw. LMM-KB-E zu bewerten.
⁷⁾ Achtung: Sofern diese Kategorie gewählt wurde, wird empfohlen, diese Teil-Tätigkeit auch mit der LMM-KH bzw. LMM-KH-E zu bewerten!

Arbeitsorganisation / Zeitliche Verteilung		Eigene Interpolation: <input checked="" type="checkbox"/>	Wichtung
Gut: Häufig Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten (mit anderen Belastungsarten) / ohne enge Abfolge von höheren Belastungen innerhalb einer Belastungsart an einem Arbeitstag.			0 <input checked="" type="checkbox"/>
Eingeschränkt: Selten Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten (mit anderen Belastungsarten) / gelegentlich enge Abfolge von höheren Belastungen innerhalb einer Belastungsart an einem Arbeitstag.			2
Ungünstig: Kein/kaum Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten (mit anderen Belastungsarten) / häufig enge Abfolge von höheren Belastungen innerhalb einer Belastungsart an einem Arbeitstag mit zeitweise hohen Belastungsspitzen.			4

0

3. Schritt: Bewertung und Beurteilung

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Handbereich	10	
Kraftübertragung / Greifbedingungen +	1.5	
Hand-Arm-Stellung und -bewegung +	0	
Ungünstige Ausführungsbedingungen +	0	
Körperhaltung +	1.5	
Arbeitsorganisation / Zeitliche Verteilung +	0	
Summe Merkmalswichtigungen:	13	=
Zeitwichtung: 0.9	x	11

Anhand des errechneten Punktwertes und der folgenden Tabelle kann eine grobe Beurteilung vorgenommen werden:					
Risiko	Risikobereich	Belastungshöhe ⁷⁾	a) Wahrscheinlichkeit körperlicher Überbeanspruchung b) Mögliche gesundheitliche Folgen	Maßnahmen	
	1	<20 Punkte	gering	a) Körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich b) Gesundheitsgefährdung nicht zu erwarten	Keine
	2	20 – <50 Punkte	mäßig erhöht	a) Körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. b) Ermüdung, geringgradige Anpassungsbeschwerden, die in der Freizeit kompensiert werden können	Für vermindert belastbare Personen sind Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sinnvoll.
	3	50 – <100 Punkte	wesentlich erhöht	a) Körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich b) Beschwerden (Schmerzen) ggf. mit Funktionsstörungen, meistens reversibel, ohne morphologische Manifestation	Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sind zu prüfen.
	4	≥100 Punkte	hoch	a) Körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. b) Stärker ausgeprägte Beschwerden und / oder Funktionsstörungen, Strukturschäden mit Krankheitswert	Maßnahmen zur Gestaltung sind erforderlich. Sonstige Präventionsmaßnahmen sind zu prüfen.

⁷⁾ Die Grenzen zwischen den Risikobereichen sind aufgrund der individuellen Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen fließend. Damit darf die Einstufung nur als Orientierungshilfe verstanden werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit steigenden Punktwerten die Wahrscheinlichkeit einer körperlichen Überbeanspruchung zunimmt.

Abb. E25: LMM zur Beurteilung und Gestaltung bei manuellen Arbeitsprozessen – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Waflos RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion – Seite 2 von 2

Erweiterte Leitmerkmalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen (LMM-MA-E)

Arbeitsplatz / Teil-Tätigkeit:	Rüstprozess "Wafios RBV35" - HoloLens		
Zeitdauer des Arbeitstages:	8h	Beurteiler:	N.D. Abele
Zeitdauer der Teil-Tätigkeit:	60 Minuten	Datum:	

1. Schritt: Bestimmung der Zeitwichtung 60 Minuten Interpolation: Zeitdauer

Gesamtdauer dieser Teil-Tätigkeit pro Arbeitstag [bis ... Stunden]	bis 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zeitwichtung:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

2. Schritt: Bestimmung der Wichtungen der weiteren Merkmale

10

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Handbereich in einer „Norm-Minute“		Halten¹⁾			Bewegen				
		mittl. Haltedauer [Sek. pro Minute]			mittl. Bewegungshäufigkeiten [Anzahl pro Minute]				
		31-60	16-30	≤15	<5	5-15	16-30	31-60	61-90 ³⁾
		Wichtung			Wichtung				
Höhe	Beschreibung, typische Beispiele	5,5	3	1,5	0,5	1	2,5	5	7
gering	Sehr geringe / geringe Kräfte (bis 15 % F _{maxM}) z. B. Tastenbedienung / Verschieben / Ordnen / Materialführung / Einlegen von kleinen Teilen	9	4,5	2,5	0,5	2	4	7,5	11
	Mittlere Kräfte (bis 30 % F _{maxM}) z. B. Greifen / Fügen von kleinen Werkstücken mit der Hand oder kleinen Werkzeugen	14	7	3,5	1	3	6	12	18
	Hohe Kräfte (bis 50 % F _{maxM}) z. B. Drehen / Wickeln / Verpacken / Fassen / Halten oder Fügen von Teilen / Eindrücken / Schneiden / Arbeiten mit kleineren angetriebenen Handwerkzeugen	22	11	5,5	1,5	5	10	19	
	Sehr hohe Kräfte (bis 80 % F _{maxM}) z. B. kraftbetontes Schneiden / Arbeit mit kleinen Tackern / Bewegen oder Halten von Teilen oder Werkzeugen	100	35	8	30	100			
	Spitzenkräfte²⁾ (über 80 % F _{maxM}) z. B. Schrauben anziehen, lösen / Trennen / Eindrücken	8	30						
	Kräftiges Schlagen³⁾ mit Daumenballen, Handfläche oder Faust				8	30			
Der Arbeitszyklus ist zu beobachten und die Wichtungen für die Kraftkategorien zu markieren. Addiert (linke und rechte Hand getrennt) ergeben diese die Kraftwichtung. Für die Errechnung der Gesamtpunktzahl (Schritt 3) ist der höhere Wert zu verwenden.		Wichtungen der Kraftausübungen:			Linke Hand 3.5	Rechte Hand 10			

¹⁾ Als Haltearbeit werden nur dann Zeiteile berücksichtigt, wenn ein Arm mindestens 4 Sekunden durchgehend statisch gehalten wird!
²⁾ Achtung: Sofern eine dieser Kategorien gewählt wurde, wird empfohlen, diese Teil-Tätigkeit auch mit der LMM-GK bzw. LMM-GK-E zu bewerten! Ggf.s. können diese Kräfte gar nicht oder nicht mehr sicher aufgebracht werden. Dies gilt insbesondere für Frauen.
³⁾ Bei noch höheren Häufigkeiten ist die Merkmalswichtung zu extrapolieren (mit hinterlegtem Algorithmus).

1.5

Kraftübertragung / Greifbedingungen		Eigene Interpolation: <input checked="" type="checkbox"/>	Wichtung
Optimale Kraftübertragung/-einleitung / Arbeitsgegenstände gut greifbar (z. B. Stabform, Griffmulden) / gute ergonomische Griffgestaltung (Griffe, Tasten, Werkzeuge)			0
Eingeschränkte Kraftübertragung/-einleitung / erhöhte Haltekräfte erforderlich / keine gestalteten Griffe			2
Kraftübertragung/-einleitung erheblich behindert / Arbeitsgegenstände kaum greifbar (schmierig, weich, scharfkantig) / keine oder ungeeignete Griffe			4

1

Hand-/Armstellung und -bewegung⁴⁾		Eigene Interpolation:	Wichtung
	Gut: Stellung oder Bewegungen der Gelenke im mittleren (entspannten) Bereich, nur selten Abweichungen / keine andauernde statische Armhaltung / Hand-Arm-Auflage bei Bedarf möglich		0
	Eingeschränkt: Gelegentliche Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / gelegentlich lange andauernde statische Armhaltung		1 <input checked="" type="checkbox"/>
	Ungünstig: Häufige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / häufig lange andauernde statische Armhaltung		2
	Schlecht: Ständige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / ständig lange andauernde statische Armhaltung		3





⁴⁾ Es sind die typischen Stellungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.

0

Ungünstige Ausführungsbedingungen (nur angeben, wenn zutreffend)		Eigene Interpolation:	Wichtung
Gut: Es liegen keine ungünstigen Ausführungsbedingungen vor, d. h. sichere Detaillerkennbarkeit / keine Blendung / gute klimatische Bedingungen			0 <input checked="" type="checkbox"/>
Eingeschränkt: Gelegentlich erschwerte Detaillerkennbarkeit durch Blendung oder zu kleine Details Erschwerende Bedingungen wie Zugluft, Kälte, Nässe und/oder Konzentrationsstörungen durch Geräusche			1
Ungünstig: Häufige erschwerte Detaillerkennbarkeit durch Blendung oder zu kleine Details Häufig erschwerende Bedingungen wie Zugluft, Kälte, Nässe und/oder Konzentrationsstörungen durch Geräusche			2

In der Tabelle nicht genannte Merkmale sind sinngemäß zu berücksichtigen.

Abb. E26: LMM zur Beurteilung und Gestaltung bei manuellen Arbeitsprozessen – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens – Seite 1 von 2


Körperhaltung/-bewegung ^{5) 6)}		Eigene Interpolation: <input checked="" type="checkbox"/>	Wichtung
	<ul style="list-style-type: none"> * Wechsel von Sitzen und Stehen, Wechsel von Stehen und Gehen, dynamisches Sitzen möglich - Rumpf maximal sehr leicht vorgeeigt - keine Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar - Kopfhaltung: variabel, kein Rückwärts- und / oder starkes Vorneigen bzw. dauernde Drehung - kein Greifen über Schulterhöhe/ kein körperfernes Greifen 		0
	<ul style="list-style-type: none"> - überwiegend Sitzen oder Stehen mit gelegentlichem Gehen * Rumpf mit leichter Neigung des Körpers zum Handlungsbereich * gelegentliche Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar * gelegentliche Abweichungen von einer guten „neutralen“ Kopfhaltung/ -bewegung - gelegentliches Greifen über Schulterhöhe / gelegentliches körperfernes Greifen 		2
	<ul style="list-style-type: none"> - ausschließlich Stehen oder Sitzen ohne Gehen - Rumpf deutlich vorgeeigt und/oder häufige Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar - häufige Abweichungen von einer guten „neutralen“ Kopfhaltung/ -bewegung * Kopfhaltung zur Detailerkennung vorgegeben / eingeschränkte Bewegungsfreiheit * häufiges Greifen über Schulterhöhe / häufiges körperfernes Greifen 		4
	<ul style="list-style-type: none"> - Rumpf stärker vorgeeigt / häufiges oder langandauerndes Bücken - Arbeiten im Knien, Hocken, Liegen - ständige Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung erkennbar - streng fixierte Körperhaltung / visuelle Kontrolle der Handlung über Lupen oder Mikroskope - ständige Abweichungen von einer guten „neutralen“ Kopfhaltung/ -bewegung - ständiges Greifen über Schulterhöhe / ständiges körperfernes Greifen 		6 ⁷⁾

⁵⁾ Es sind die typischen Körperhaltungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.
⁶⁾ Werden die manuellen Arbeitsprozesse nicht stationär im Sitzen, Stehen, Knien, Hocken, Liegen ausgeführt, sondern in der Bewegung (Gehen, Kriechen), wird empfohlen, die Teil-Tätigkeit auch mit der LMM-KB bzw. LMM-KB-E zu bewerten.
⁷⁾ Achtung: Sofern diese Kategorie gewählt wurde, wird empfohlen, diese Teil-Tätigkeit auch mit der LMM-KH bzw. LMM-KH-E zu bewerten!

Arbeitsorganisation / Zeitliche Verteilung		Eigene Interpolation: <input checked="" type="checkbox"/>	Wichtung
Gut: Häufig Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten (mit anderen Belastungsarten) / ohne enge Abfolge von höheren Belastungen innerhalb einer Belastungsart an einem Arbeitstag.			0 <input checked="" type="checkbox"/>
Eingeschränkt: Selten Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten (mit anderen Belastungsarten) / gelegentlich enge Abfolge von höheren Belastungen innerhalb einer Belastungsart an einem Arbeitstag.			2
Ungünstig: Kein/kaum Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten (mit anderen Belastungsarten) / häufig enge Abfolge von höheren Belastungen innerhalb einer Belastungsart an einem Arbeitstag mit zeitweise hohen Belastungsspitzen.			4

3. Schritt: Bewertung und Beurteilung

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Handbereich	10
Kraftübertragung / Greifbedingungen +	1.5
Hand-Arm-Stellung und -bewegung +	1
Ungünstige Ausführungsbedingungen +	0
Körperhaltung +	2
Arbeitsorganisation / Zeitliche Verteilung +	0
Summe Merkmalswichtungen:	14.5
Zeitwichtung: 1	14

Anhand des errechneten Punktwertes und der folgenden Tabelle kann eine grobe Beurteilung vorgenommen werden:					
Risiko	Risikobereich	Belastungshöhe ⁷⁾	a) Wahrscheinlichkeit körperlicher Überbeanspruchung b) Mögliche gesundheitliche Folgen	Maßnahmen	
	1	<20 Punkte	gering	a) Körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich b) Gesundheitsgefährdung nicht zu erwarten	Keine
	2	20 – <50 Punkte	mäßig erhöht	a) Körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. b) Ermüdung, geringgradige Anpassungsbeschwerden, die in der Freizeit kompensiert werden können	Für vermindert belastbare Personen sind Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sinnvoll.
	3	50 – <100 Punkte	wesentlich erhöht	a) Körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich b) Beschwerden (Schmerzen) ggf. mit Funktionsstörungen, meistens reversibel, ohne morphologische Manifestation	Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sind zu prüfen.
	4	≥100 Punkte	hoch	a) Körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. b) Stärker ausgeprägte Beschwerden und / oder Funktionsstörungen, Strukturschäden mit Krankheitswert	Maßnahmen zur Gestaltung sind erforderlich. Sonstige Präventionsmaßnahmen sind zu prüfen.

⁷⁾ Die Grenzen zwischen den Risikobereichen sind aufgrund der individuellen Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen fließend. Damit darf die Einstufung nur als Orientierungshilfe verstanden werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit steigenden Punktwerten die Wahrscheinlichkeit einer körperlichen Überbeanspruchung zunimmt.

Abb. E27: LMM zur Beurteilung und Gestaltung bei manuellen Arbeitsprozessen – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Waflos RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens – Seite 2 von 2

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6							
Werk		Mitarbeiter: Geschlecht m <input checked="" type="checkbox"/> w <input type="checkbox"/>		Körpergröße 186 cm			
Linie		MTM-Analyse		Analyst N.D. Abele			
Arbeitsaufgabe/-platz Rüstprozess „Wafios RBV35“ - Papierinstruktion		Dauer der Aufgabe [s] 1.080		Beobachtung <input checked="" type="checkbox"/> Planung <input type="checkbox"/>		Datum	
Gesamtergebnis Punkte für "Gesamtkörper" berechnen und mit "Obere Extremitäten" vergleichen. Der höhere Wert bestimmt das Gesamtergebnis. Die entsprechende Ampelfarbe ist zu markieren. Beim Auswerten beide Werte betrachten.							
<input checked="" type="checkbox"/> Grün <input type="checkbox"/> Gelb <input type="checkbox"/> Rot	Gesamtkörper =	Haltung +	Kräfte +	Lasten +	Extra +	Obere Extremit.	
	41	13	18,5	5,5	4	1	
EAWS Bewertung	0-25 Punkte		Niedriges Risiko: empfehlenswert; Maßnahmen nicht erforderlich				
	>25-50 Punkte		Mögliches Risiko: nicht empfehlenswert; Maßnahmen zur erneuten Gestaltung / Risikobeherrschung ergreifen				
	>50 Punkte		Hohes Risiko: vermeiden; Maßnahmen zur Risikobeherrschung erforderlich				
Extrapunkte "Gesamtkörper" (pro Minute / Schicht)						Extrapunkte	
0a	Beeinträchtigung durch Arbeit an sich bewegenden Objekten	0 keine	3 mittel	8 stark	15 sehr stark	Intensität 0	
0b	Zugänglichkeit (z. B. im Motor- oder Fahrgastraum)	0 gut	2 erschwert	5 schlecht	10 sehr schlecht	Status 0,5	
0c	Rückschlagkräfte, Impulse, Schwingungen	0 gering	1 sichtbar	2 stark	5 sehr stark	Intensität × Häufigkeit 0	
		0	1	2	5		
		[n]	1 - 2	4 - 5	8 - 10	18 - 20	> 20
0d	Gelenkstellung (insb. Handgelenk)	0 neutral	1 ~ 1/3 max	3 ~ 2/3 max	5 maximal	Intensität × Dauer oder Häufigkeit 0,5 · 6,22 = 3,11	
		0	2	2,5	4	6	8
		[s]	3	10	20	40	60
		[n]	1	8	11	16	20
		[%]	5	17	33	67	100
0e	Andere körperliche Belastungen (bitte beschreiben)	0 keine	5 mittel	10 stark	15 sehr stark	Intensität 0	
Extra = Σ Zeilen 0a – 0e		Achtung: Max. Punktzahl = 40 (Zeilen 0c, 0d), = 15 (Zeilen 0a, 0e) bzw. = 10 (Zeile 0b)		Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s		4	
Zeilen 0a-b gelten vor allem für die Autoindustrie. In anderen Branchen können weitere Elemente hinzukommen. Details s. Lehrgangsunterlage EAWS.							
Daten für die Bewertung der repetitiven Tätigkeiten			Bemerkungen / Verbesserungsvorschläge				
Beschreibung	Formel	Ergebnis					
Tatsächliche Schichtdauer [min]		480					
Mittagspause [min]	-	30					
Andere offizielle Pausen [min]	-	25					
Nichtrepetitive Tätigkeiten [min] (z. B. Reinigung, Materialbeschaffung, etc.)	-	371					
Nettodauer der repetit. Tätigkeit/en (a) [min]	=	54					
Anzahl an Einheiten (od. Takten/Zyklen) (b)		3					
Netto-Zykluszeit [s]	(a/b × 60) =	1.080					
Taktausgleichszeit [s]		0					

Abb. E28: EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion – Seite 1 von 4

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6																				
Körperstellung / Rumpf- und Armhaltungen										Körperhaltung										
(inkl. Lasten < 3 kg Fingerkräfte < 30 N und Arm-,Ganzkörperkräfte < 40 N) Statische Körperhaltungen ≥ 4 s Hochfrequente Bewegungen: Rumpfbewegungen (> 60°) ≥ 2/min Knien/Hocken ≥ 2/min Arm heben (> 60°) ≥ 10/min										Symmetrische					Asymmetrische					
										Bewertung statischer Körperhaltungen und/oder hochfrequenter Bewegungen des Rumpfes/der Arme/Beine										Zeile
$Dauer [s/min] = \frac{Dauer\ der\ Körperhaltung [s] \times 60}{Dauer\ der\ Aufgabe [s]}$										Σ	Inten.	Dauer	Inten.	Dauer	Inten.	Dauer				
[%] [s/min] [min/8h]											0-5	0-3	0-5	0-3	0-5	0-2				
										Intensität × Dauer	Intensität × Dauer	Intensität × Dauer	Intensität × Dauer	Intensität × Dauer	Intensität × Dauer					
Stehen (und Gehen)																				
1		Stehen & Gehen im Wechsel, Stehen mit Abstützung	0	0	0	0	0,5	1	1	1	1,5	2	0,5							
2		Stehen, beengter Raum	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13								
3		a Nach vorn gebeugt (20-60°)	2	3	5	7	9,5	12	18	23	32	40	11,03							
		b Mit geeigneter Abstützung	1,3	2	3,5	5	6,5	8	12	15	20	25								
4		a Stark gebeugt >60°	3,3	5	8,5	12	17	21	30	38	51	63								
		b Mit geeigneter Abstützung	2	3	5	7	9,5	12	18	23	31	38								
5		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	3,3	5	8,5	12	17	21	30	38	51	63								
6		Hände über Kopfhöhe	5,3	8	14	19	26	33	47	60	80	100								
Sitzen																				
7		Aufrecht mit Rückenstütze, ggf. leicht nach vorne/hinten geneigt	0	0	0	0	0	0,5	1	1,5	2									
8		Aufrecht ohne Rückenstütze (für weitere Einschränkungen s. Extrapunkte)	0	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5	7								
9		Nach vorn gebeugt	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13								
10		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	2,7	4	7	10	13	16	23	30	40	50								
11		Hände über Kopfhöhe	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75								
Knien oder Hocken																				
12		Aufrecht	3,3	5	7	9	12	15	21	27	36	45								
13		Nach vorn gebeugt	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75								
14		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	6	9	16	23	33	43	62	80	108	135								
Liegen & Klettern																				
15		Liegen (auf Rücken, Brust oder Seite) mit Armen über dem Kopf	6	9	15	21	29	37	53	68	91	113								
16		Klettern	6,7	10	22	33	50	66												
1)		Rumpf	Inten.	0	1	3	5	2)		Reichweite	Inten.	0	1	3	5	12,81	Σ	0 (max.=15)	0 (max.=15)	0 (max.=10)
		leicht	mittel	stark	extrem			körpermah	60%	80%	Arm gestreckt									
		≤10°	15°	25°	≥30°			0	1	1,5	2									
		0	1,5	2,5	3			nie	4 s	10 s	≥ 13 s									
		Dauer	0%	6%	15%	≥ 20%			0%	6%	15%	≥ 20%	(a)		0		(b)			

Abb. E29: EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion – Seite 2 von 4

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6

Aktionskräfte (pro Minute)										Kräfte	
17		Fingerkräfte (z. B. Clipse, Stecker)	Int	0	7	15	25	50	Intensität × Dauer	0	
				16,7% F _{max}	33,3% F _{max}	50,0% F _{max}	66,7% F _{max}	F _{max}			
			0	1	1,5	2	3,5	7			
18		Arm-, Ganzkörperkräf- te	Int	0	6	15	25	50	Intensität × Dauer	29,55 · 0,61	18,05
				16,7% F _{max}	33,3% F _{max}	50,0% F _{max}	66,7% F _{max}	F _{max}			
			0	1	1,5	2	4	8,5			
			Dauer	stat	[s]	3	6	9	12	20	≥30
			Dauer	dyn	[n]	5	10	15	20	33	≥50
						0	1,5	2	2,5	3	
						4	10	15	15	≥20	
						0	1	2	3	4,5	10
						1	3	6	8	10	≥12

Fmax Arm-, Ganzkörperkräfte	ST aufrecht	M	F	ST gebeugt	M	F	ST über Kopf	M	F	Fmax Fingerkräfte (F=Frauen M=Männer)
M für Männer & F für Frauen		*A 480	315		*A 435	285		*A 430	280	A1 (Umfassungsgriff, Zangengriff)
		*A 500	325		*A 370	240		*A 495	320	F _{max}
		*B 320	210		*B 400	260		*B 305	200	M F
		*B 485	315		*B 605	390		*B 480	310	315 205
		*C 290	185		*C 310	200		*C 210	140	A2 (Kontaktgriff)
		*C 255	165		*C 205	135		*C 210	140	F _{max}
										M F
										235 155
										B1 (Daumenkontaktgriff, Zufassungsgriff)
										F _{max}
										M F
										110 70
										B2 (Zeigefinger oder Zeigefinger-Daumen)
										F _{max}
										M F
										75 50
										C (Palmar, Daumen auf 2 Finger)
										F _{max}
										M F
										85 55

Aktionskräfte = Σ Zeilen 17 – 18	Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s	=	18,5
----------------------------------	---	---	-------------

Manuelles Handhaben von Lasten (pro Schicht)

Manuelles Handhaben von Lasten (pro Schicht)										Lasten				
Lastgewichte [kg] beim Umsetzen (Heben / Absetzen), Tragen und Halten sowie Ziehen und Schieben														
+	Umsetzen, Tragen & Halten	Männer (Kg)	3	10	15	20	25	30	35	≥40				
		Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25				
		Frauen (Kg)	2	5	7	10	12	15	20	≥25				
		Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25				
+	Ziehen und Schieben	M1 Karren	Männer (Kg)	<50	75	100	150	200	≥250					
			Frauen (Kg)	<40	60	80	115	155	≥195					
		M2 Trolleys und Transportwagen	Männer (Kg)	<50	75	100	150	250	350	≥550				
			Frauen (Kg)	<40	60	80	115	195	270	≥425				
		M3 Schienenwagen, Hubwagen	Männer (Kg)	<50	75	150	250	350	500	600	800	≥1250		
			Frauen (Kg)	<40	60	115	195	270	385	460	615	≥960		
Lastpunkte		Transportmittel		0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8		
Körperhaltung, Position der Last (charakteristische Körperhaltung wählen)														
+		Oberkörper aufrecht und nicht verdreht, Last am Körper	geringes Rumpfeigen oder -drehen, Last am Körper oder körperrnah	tiefes Beugen oder weites Vorneigen; geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers; Last körperrn o. über Schulterhöhe	Asymmetrische Körperhaltungen (Rumpf weit nach vorne beugen und verdrehen; Last körperrn; eingeschränkte Haltungsverstabilität beim Stehen oder Hocken) oder kniend									
		Haltungspunkte	1	2	4	8								
Ausführungsbedingungen (nur bei Ziehen und Schieben von Wagen)														
(+)	sehr geringer Rollwiderstand	Wagen ziehen/schieben auf glattem Boden	auf rauem Boden; über kleine Fugen/Kanten	auf Riffelblech, in/aus Gleis bzw. Spur	Wagen müssen b. Anfahren losgeriss werden, stark beschädigter Fahrgew				sehr hoher Rollwiderstand					
	Ausführungspunkte	0	1	3	5	6	8							
Häufigkeit der Lastenhandhabung [Häufigkeit/Schicht], Haltedauer [min/Schicht] oder Wegstrecke [Meter/Schicht]														
x	Häufigkeit (#) Umsetzvorgänge / Ziehen & Schieben kurz	5	25	120	350	750	1000	1500	2000	2500	≥3000			
	Haltedauer [min]	2,5	10	37	90	180	≥240							
	Strecke (Tragen, Ziehen & Schieben lang) [m]	300	650	2500	6000	12000	≥16000							
Dauerpunkte		1	2	4	6	8	10	11	13	14	15			
Manuelles Handhaben von Lasten (Ergebnis)														
19	(Last + Haltung + (Ausführung)) × Dauerpunkte	Umsetzen 1)	(3,30 + 1,5)	Halten 1)	() + ()	Tragen 1)	() + ()	Ziehen & Schieben kurz 1)	() + ()	Ziehen & Schieben lang 1)	() + ()			
		x	1,05		=		5,04		x		=	x	=	x
Handhaben Lasten = Σ Zeile 19		1) Summe der Dauerpunkte für Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen & Schieben maximal = 15							=	5,5				

Abb. E30: EAWs zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion – Seite 3 von 4




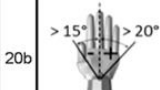
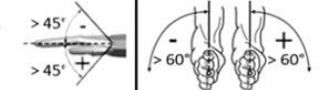

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6																																																
Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten															Obere Extremitäten																																	
Kraft & Häufigkeit & Griff (FFG)										Anzahl der realen Aktionen pro Min. bzw. Anteil stat. Aktionen (zu betrachten ist die am meisten belastete Extremität)																																						
  		%SA = % Statische Aktionen					%DA = 100% - %SA																																									
		FDS = Kraft-Dauer - Punkte für statische Aktionen					FFD = Kraft-Häufigkeit - Punkte für dynamische Aktionen																																									
		GS' = Modifi. Griffpunkte für statische Aktionen (Griff × %SA)					GD = Griffpunkte für dynamische Aktionen																																									
		%FLS = Prozentsatz der statischen Aktionen im Kraftniveau					%FLD = Prozentsatz der dynamischen Aktionen im Kraftniveau																																									
		SC = Statischer Anteil					DC = Dynamischer Anteil																																									
FDGS = Summe der statischen Anteile					FFGD = Summe der dynamischen Anteile																																											
Kraft [N]	Berechnung stat.				Statische Aktionen (s/min)					Greifbeding.			Dynamische Aktionen (reale Akt./min)							Berechnung dyn.																												
	FDS	GS'	%FLS	SC	≥45	30	20	10	5	3	0	2	4	2	10	15	20	25	30	35	≥40	FFD	GD	%FLD	DC																							
0 – 5	1	0	58,33	0,58	1	1	0	0	0	0	abc			0	0	0	1	2	3	4	7	2,91	0	15,47	0,22																							
> 5 – 20					4	2	1	1	0	0	ab	bc		0	0	1	2	3	4	6	9	4,91	0	5,49	0,13																							
> 20 – 35					7	5	3	2	1	1	ab	b	c	0	1	2	3	4	6	8	12	3,45	2	8,73	0,48																							
> 35 – 90					11	8	5	3	2	1	a	b	b	1	2	3	5	7	9	12	18	5,91	0	5,49	0,32																							
> 90 – 135					16	11	7	4	3	2	a	ab	b	2	3	5	7	9	12	15	24																											
> 135 – 225					21	14	10	6	4	3	a	a	b	4	5	6	8	11	14	20	32																											
> 225 – 300					28	18	12	8	5	4	a	a	b	5	6	7	9	12	16	26	40																											
20a	FDGS = ∑ SC _i				FFG = FDGS + FFGD					1,7			%DA = ∑ DC _i							FFGD = ∑ DC _i				35,19		1,12																						
Hand- / Arm- / Schulterhaltungen (Zeitanteil der ungünstigsten Haltung von Handgelenk/Ellbogen/Schulter berücksichtigen)																																																
Handgelenk (Rad/ul, Flex/Exten)					Ellbogen (Pronation/Supin., Flex/Exten)					Schulter (Flexion/Extension, Abduktion)																																						
 > 15° > 20° > 45° > 45°					 > 60° > 60°					 > 60° > 60° + 20° 0° + 45° + 80°																																						
Haltungspunkte					10%					25%					33%					50%					65%					≥85%					0		PP											
Zusatzfaktoren					0					0,5					1					2					3					4																		
20c Ungeeignete Handschuhe (welche die Handhabung beeinträchtigen) müssen für über die Hälfte der Zeit verwendet werden 2 <input type="checkbox"/> Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge mindestens 2 Mal pro Minute (z. B. Hämmern auf harter Oberfläche) 2 <input type="checkbox"/> Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge (Hand wird als Werkzeug benutzt), mindestens 10 Mal pro Stunde 2 <input type="checkbox"/> Arbeit bei Kälte oder Kühlung (unter 0° C), über die Hälfte der Zeit oder mehr 2 <input type="checkbox"/> Arbeit mit vibrierenden Werkzeugen, über ein Drittel der Zeit oder mehr 2 <input type="checkbox"/> Verwendung von stark vibrierenden Werkzeugen 4 <input type="checkbox"/> Die verwendeten Werkzeuge verursachen Kompressionen der Haut (Rötungen, Schwielen, Blasen etc.) 2 <input type="checkbox"/> Präzisionsaufgaben (Aufgaben mit einer räumlichen Genauigkeit von < 2-3 mm), über die Hälfte der Zeit oder mehr 2 <input type="checkbox"/> Zwei oder mehr Zusatzfaktoren treten gleichzeitig und über die ganze Zeit hinweg auf 3 <input type="checkbox"/> Zusatzfaktorenpunkte (den höchsten auftretenden Wert wählen) = 0 AF																																																
Dauer der repetitiven Tätigkeiten																																																
Nettodauer [min/Schicht]					< 60					90					180					300					420					480					+		1											
Schichtpunkte (1 Stunde = 1 Punkt)					1					1,5					3					5					7					8																		
Arbeitsorganisation					Arbeitsunterbrechungen jederzeit möglich					Unterbrechungen möglich innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen					Unterbrechungen führen zu Prozessunterbrechung										+		0																					
Organisationspunkte					0					1					2					3					4					5					6					≥7								
Pausen (≥ 8 min) [# / Schicht]					0					1					2					3					4					5					6					≥7								
Pausenpunkte					3					2					1					0					-1					-2					-3					-4					+		-0,5	
Dauerpunkte					0					-0,5					-1					-1,5					-2										=		0,5		DP									
Gesamtbewertung der Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten																																																
(a) Kraft & Häufigkeit & Griff					(b) Haltungspunkte					(c) Zusatzfaktorenpunkte					(d) Dauerpunkte					Obere Extremitäten																												
20 (1,6 FFG					+ 0 PP					+ 0 AF					× 0,5 DP					= 1																												

Abb. E31: EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der Papierinstruktion – Seite 4 von 4

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6										
Werk		Mitarbeiter: Geschlecht m <input checked="" type="checkbox"/> w <input type="checkbox"/>		Körpergröße 186 cm						
Linie		MTM-Analyse		Analyst N.D. Abele						
Arbeitsaufgabe/-platz Rüstprozess „Wafios RBV35“ - HoloLens		Dauer der Aufgabe [s] 1.200		Beobachtung <input checked="" type="checkbox"/> Planung <input type="checkbox"/>		Datum				
Gesamtergebnis Punkte für "Gesamtkörper" berechnen und mit "Obere Extremitäten" vergleichen. Der höhere Wert bestimmt das Gesamtergebnis. Die entsprechende Ampelfarbe ist zu markieren. Beim Auswerten beide Werte betrachten.										
<input type="checkbox"/> Grün <input type="checkbox"/> Gelb <input type="checkbox"/> Rot	Gesamtkörper 41	=	Haltung 8	+	Kräfte 16,5	+	Lasten 11	+	Extra 5,5	Obere Extremit. 1
EAWS Bewertung	0-25 Punkte		Grün	Niedriges Risiko: empfehlenswert; Maßnahmen nicht erforderlich						
	>25-50 Punkte		Gelb	Mögliches Risiko: nicht empfehlenswert; Maßnahmen zur erneuten Gestaltung / Risikobeherrschung ergreifen						
	>50 Punkte		Rot	Hohes Risiko: vermeiden; Maßnahmen zur Risikobeherrschung erforderlich						
Extrapunkte "Gesamtkörper" (pro Minute / Schicht)								Extrapunkte		
0a	Beeinträchtigung durch Arbeit an sich bewegenden Objekten	0 keine	3 mittel	8 stark	15 sehr stark	Intensität		0		
0b	Zugänglichkeit (z. B. im Motor- oder Fahrgastraum)	0 gut	2 erschwert	5 schlecht	10 sehr schlecht	Status		1		
0c	Rückschlagkräfte, Impulse, Schwingungen	0 gering	1 sichtbar	2 stark	5 sehr stark	Intensität × Häufigkeit		0		
0d	Gelenkstellung (insb. Handgelenk)	0 neutral	1 ~ 1/3 max	3 ~ 2/3 max	5 maximal	Intensität × Dauer oder Häufigkeit		0,5 · 8,2 = 4,1		
0e	Andere körperliche Belastungen (bitte beschreiben)	0 keine	5 mittel	10 stark	15 sehr stark	Intensität		0		
Extra = Σ Zeilen 0a – 0e		Achtung: Max. Punktzahl = 40 (Zeilen 0c, 0d), = 15 (Zeilen 0a, 0e) bzw. = 10 (Zeile 0b)			Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s		= 5,5			
Zeilen 0a-b gelten vor allem für die Autoindustrie. In anderen Branchen können weitere Elemente hinzukommen. Details s. Lehrgangsunterlage EAWS.										
Daten für die Bewertung der repetitiven Tätigkeiten				Bemerkungen / Verbesserungsvorschläge						
Beschreibung	Formel	Ergebnis								
Tatsächliche Schichtdauer [min]		480								
Mittagspause [min]	-	30								
Andere offizielle Pausen [min]	-	25								
Nichtrepetitive Tätigkeiten [min] (z. B. Reinigung, Materialbeschaffung, etc.)	-	365								
Nettodauer der repetit. Tätigkeit(en) (a) [min]	=	60								
Anzahl an Einheiten (od. Takten/Zyklen) (b)		3								
Netto-Zykluszeit [s]	(a/b × 60) =	1.200								
Taktausgleichszeit [s]		0								

Abb. E32: EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens – Seite 1 von 4

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6																							
Körperstellung / Rumpf- und Armhaltungen										Körperhaltung													
(inkl. Lasten < 3 kg Fingerkräfte < 30 N und Arm-,Ganzkörperkräfte < 40 N) Statische Körperhaltungen ≥ 4 s Hochfrequente Bewegungen: Rumpfbewegungen (> 60°) ≥ 2/min Knien/Hocken ≥ 2/min Arm heben (> 60°) ≥ 10/min										Symmetrische					Asymmetrische								
										Bewertung statischer Körperhaltungen und/oder hochfrequenter Bewegungen des Rumpfes/der Arme/Beine										Zeile	Rumpfdrehung 1)	Rumpfneigung 1)	Reichweite 2)
Dauer [s/min] = $\frac{\text{Dauer der Körperhaltung [s]} \times 60}{\text{Dauer der Aufgabe [s]}}$										Inten.	Dauer	Inten.	Dauer	Inten.	Dauer								
[%]										0-5	0-3	0-5	0-3	0-5	0-2								
[s/min]										Intensität x Dauer	Intensität x Dauer	Intensität x Dauer	Intensität x Dauer	Intensität x Dauer									
[min/8h]										24	36	48	72	96	130	160	240	320	≥400				
Stehen (und Gehen)																							
1		Stehen & Gehen im Wechsel, Stehen mit Abstützung	0	0	0	0	0,5	1	1	1	1,5	2	2										
2		Stehen, beengter Raum	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13											
3		a) Nach vorn gebeugt (20-60°)	2	3	5	7	9,5	12	18	23	32	40	6										
		b) Mit geeigneter Abstützung	1,3	2	3,5	5	6,5	8	12	15	20	25											
4		a) Stark gebeugt >60°	3,3	5	8,5	12	17	21	30	38	51	63											
		b) Mit geeigneter Abstützung	2	3	5	7	9,5	12	18	23	31	38											
5		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	3,3	5	8,5	12	17	21	30	38	51	63											
6		Hände über Kopfhöhe	5,3	8	14	19	26	33	47	60	80	100											
Sitzen																							
7		Aufrecht mit Rückenstütze, ggf. leicht nach vorne/hinten geneigt	0	0	0	0	0	0,5	1	1,5	2												
8		Aufrecht ohne Rückenstütze (für weitere Einschränkungen s. Extrapunkte)	0	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5	7											
9		Nach vorn gebeugt	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13											
10		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	2,7	4	7	10	13	16	23	30	40	50											
11		Hände über Kopfhöhe	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75											
Knien oder Hocken																							
12		Aufrecht	3,3	5	7	9	12	15	21	27	36	45											
13		Nach vorn gebeugt	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75											
14		Ellenbogen auf / über Schulterhöhe	6	9	16	23	33	43	62	80	108	135											
Liegen & Klettern																							
15		Liegen (auf Rücken, Brust oder Seite) mit Armen über dem Kopf	6	9	15	21	29	37	53	68	91	113											
16		Klettern	6,7	10	22	33	50	66															
1)		Rumpf	Inten.	0	1	3	5	2)		Reichweite	Inten.	0	1	3	5	8	Σ	0	0	0			
				leicht	mittel	stark	extrem					körpermah	60%	80%	Arm gestreckt						Σ (max.=15)	Σ (max.=15)	Σ (max.=10)
				≤10°	15°	25°	≥30°					0	1	1,5	2								
			Dauer	0	1,5	2,5	3					nie	4 s	10 s	≥ 13 s								
				0%	6%	15%	≥ 20%					0%	6%	15%	≥ 20%	(a)							
Achtung: Max. Einstufungsdauer = Dauer der Aufgabe oder 100%!											Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s												
Haltung = Σ Zeilen 1 - 16											8	(a)	+	0	(b)	=	8						

Abb. E33: EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens – Seite 2 von 4

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6

Aktionskräfte (pro Minute)										Kräfte																																																																																																																																																																																																																																																					
17		Fingerkräfte (z. B. Clipse, Stecker)	Int	0	7	15	25	50	Intensität × Dauer	0																																																																																																																																																																																																																																																					
			stat	16,7% F _{max}	33,3% F _{max}	50,0% F _{max}	66,7% F _{max}	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																							
			[s]	0	1	1,5	2	3,5			7																																																																																																																																																																																																																																																				
18		Arm-, Ganzkörperkräfte	Int	0	6	15	25	50	Intensität × Dauer	29,55 · 0,55																																																																																																																																																																																																																																																					
			stat	16,7% F _{max}	33,3% F _{max}	50,0% F _{max}	66,7% F _{max}	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																							
			[s]	0	1	1,5	2	4			8,5																																																																																																																																																																																																																																																				
			Dauer	0	1,5	2	2,5	3	Intensität × Dauer	16,25																																																																																																																																																																																																																																																					
			dyn	[n]	4	10	15	≥20																																																																																																																																																																																																																																																							
			[n]	1	3	6	8	10			≥12																																																																																																																																																																																																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Fmax Arm-, Ganzkörperkräfte</th> <th colspan="2">ST aufrecht</th> <th colspan="2">ST gebeugt</th> <th colspan="2">ST über Kopf</th> <th colspan="2">Fmax Fingerkräfte (F=Frauen M=Männer)</th> </tr> <tr> <th colspan="2">M für Männer & F für Frauen</th> <th>M</th> <th>F</th> <th>M</th> <th>F</th> <th>M</th> <th>F</th> <th colspan="2"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="12" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <p style="font-size: small;">Daten aus: "Montagespezifischer Kraftatlas" (Wakula, Berg, Schaub, Gitsch, Ellegast 2009)</p> </td> <td colspan="2" style="text-align: center;">A1 (Umfassungsgriff, Zangengriff)</td> <td>*A</td> <td>480</td> <td>315</td> <td>*A</td> <td>435</td> <td>285</td> <td>*A</td> <td>430</td> <td>280</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">F_{max}</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">A2 (Kontaktgriff)</td> <td>*A</td> <td>500</td> <td>325</td> <td>*A</td> <td>370</td> <td>240</td> <td>*A</td> <td>495</td> <td>320</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">M F</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">B1 (Daumenkontaktgriff, Zufassungsgriff)</td> <td>*B</td> <td>320</td> <td>210</td> <td>*B</td> <td>400</td> <td>260</td> <td>*B</td> <td>305</td> <td>200</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">315 205</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">B2 (Zeigefinger oder Zeigefinger-Daumen)</td> <td>*B</td> <td>485</td> <td>315</td> <td>*B</td> <td>605</td> <td>390</td> <td>*B</td> <td>480</td> <td>310</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">F_{max}</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">C (Palmar, Daumen auf 2 Finger)</td> <td>*C</td> <td>290</td> <td>185</td> <td>*C</td> <td>310</td> <td>200</td> <td>*C</td> <td>210</td> <td>140</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">M F</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">KN aufrecht</td> <td>*A</td> <td>420</td> <td>270</td> <td>*A</td> <td>380</td> <td>245</td> <td>*A</td> <td>425</td> <td>275</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">235 155</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">KN gebeugt</td> <td>*A</td> <td>430</td> <td>280</td> <td>*A</td> <td>345</td> <td>225</td> <td>*A</td> <td>495</td> <td>320</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">F_{max}</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">KN über Kopf</td> <td>*B</td> <td>445</td> <td>290</td> <td>*B</td> <td>495</td> <td>320</td> <td>*B</td> <td>420</td> <td>270</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">M F</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI aufrecht</td> <td>*B</td> <td>495</td> <td>325</td> <td>*B</td> <td>445</td> <td>290</td> <td>*B</td> <td>435</td> <td>275</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">110 70</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI gebeugt</td> <td>*C</td> <td>300</td> <td>195</td> <td>*C</td> <td>290</td> <td>190</td> <td>*C</td> <td>285</td> <td>180</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">F_{max}</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI über Kopf</td> <td>*C</td> <td>245</td> <td>160</td> <td>*C</td> <td>205</td> <td>135</td> <td>*C</td> <td>285</td> <td>180</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">M F</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI über Kopf</td> <td>*A</td> <td>405</td> <td>265</td> <td>*A</td> <td>385</td> <td>250</td> <td>*A</td> <td>395</td> <td>255</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">75 50</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI über Kopf</td> <td>*A</td> <td>440</td> <td>285</td> <td>*A</td> <td>375</td> <td>245</td> <td>*A</td> <td>455</td> <td>295</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">F_{max}</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI über Kopf</td> <td>*B</td> <td>405</td> <td>260</td> <td>*B</td> <td>455</td> <td>295</td> <td>*B</td> <td>365</td> <td>240</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">M F</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI über Kopf</td> <td>*B</td> <td>380</td> <td>250</td> <td>*B</td> <td>425</td> <td>275</td> <td>*B</td> <td>370</td> <td>240</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">85 55</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI über Kopf</td> <td>*C</td> <td>250</td> <td>165</td> <td>*C</td> <td>270</td> <td>175</td> <td>*C</td> <td>200</td> <td>130</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">F_{max}</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">SI über Kopf</td> <td>*C</td> <td>235</td> <td>155</td> <td>*C</td> <td>205</td> <td>135</td> <td>*C</td> <td>210</td> <td>135</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">M F</td> </tr> </tbody> </table>										Fmax Arm-, Ganzkörperkräfte		ST aufrecht		ST gebeugt		ST über Kopf		Fmax Fingerkräfte (F=Frauen M=Männer)		M für Männer & F für Frauen		M	F	M	F	M	F			<p style="font-size: small;">Daten aus: "Montagespezifischer Kraftatlas" (Wakula, Berg, Schaub, Gitsch, Ellegast 2009)</p>	A1 (Umfassungsgriff, Zangengriff)		*A	480	315	*A	435	285	*A	430	280	F _{max}		A2 (Kontaktgriff)		*A	500	325	*A	370	240	*A	495	320	M F		B1 (Daumenkontaktgriff, Zufassungsgriff)		*B	320	210	*B	400	260	*B	305	200	315 205		B2 (Zeigefinger oder Zeigefinger-Daumen)		*B	485	315	*B	605	390	*B	480	310	F _{max}		C (Palmar, Daumen auf 2 Finger)		*C	290	185	*C	310	200	*C	210	140	M F		KN aufrecht		*A	420	270	*A	380	245	*A	425	275	235 155		KN gebeugt		*A	430	280	*A	345	225	*A	495	320	F _{max}		KN über Kopf		*B	445	290	*B	495	320	*B	420	270	M F		SI aufrecht		*B	495	325	*B	445	290	*B	435	275	110 70		SI gebeugt		*C	300	195	*C	290	190	*C	285	180	F _{max}		SI über Kopf		*C	245	160	*C	205	135	*C	285	180	M F		SI über Kopf		*A	405	265	*A	385	250	*A	395	255	75 50		SI über Kopf		*A	440	285	*A	375	245	*A	455	295	F _{max}		SI über Kopf		*B	405	260	*B	455	295	*B	365	240	M F		SI über Kopf		*B	380	250	*B	425	275	*B	370	240	85 55		SI über Kopf		*C	250	165	*C	270	175	*C	200	130	F _{max}		SI über Kopf		*C	235	155	*C	205	135	*C	210	135	M F		Aktionenkräfte = Σ Zeilen 17 – 18	Achtung: Werte korrigieren, wenn Dauer der Aufgabe ≠ 60 s	=	16,5
Fmax Arm-, Ganzkörperkräfte		ST aufrecht		ST gebeugt		ST über Kopf		Fmax Fingerkräfte (F=Frauen M=Männer)																																																																																																																																																																																																																																																							
M für Männer & F für Frauen		M	F	M	F	M	F																																																																																																																																																																																																																																																								
<p style="font-size: small;">Daten aus: "Montagespezifischer Kraftatlas" (Wakula, Berg, Schaub, Gitsch, Ellegast 2009)</p>	A1 (Umfassungsgriff, Zangengriff)		*A	480	315	*A	435	285	*A	430	280	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																			
	A2 (Kontaktgriff)		*A	500	325	*A	370	240	*A	495	320	M F																																																																																																																																																																																																																																																			
	B1 (Daumenkontaktgriff, Zufassungsgriff)		*B	320	210	*B	400	260	*B	305	200	315 205																																																																																																																																																																																																																																																			
	B2 (Zeigefinger oder Zeigefinger-Daumen)		*B	485	315	*B	605	390	*B	480	310	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																			
	C (Palmar, Daumen auf 2 Finger)		*C	290	185	*C	310	200	*C	210	140	M F																																																																																																																																																																																																																																																			
	KN aufrecht		*A	420	270	*A	380	245	*A	425	275	235 155																																																																																																																																																																																																																																																			
	KN gebeugt		*A	430	280	*A	345	225	*A	495	320	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																			
	KN über Kopf		*B	445	290	*B	495	320	*B	420	270	M F																																																																																																																																																																																																																																																			
	SI aufrecht		*B	495	325	*B	445	290	*B	435	275	110 70																																																																																																																																																																																																																																																			
	SI gebeugt		*C	300	195	*C	290	190	*C	285	180	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																			
	SI über Kopf		*C	245	160	*C	205	135	*C	285	180	M F																																																																																																																																																																																																																																																			
	SI über Kopf		*A	405	265	*A	385	250	*A	395	255	75 50																																																																																																																																																																																																																																																			
SI über Kopf		*A	440	285	*A	375	245	*A	455	295	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																				
SI über Kopf		*B	405	260	*B	455	295	*B	365	240	M F																																																																																																																																																																																																																																																				
SI über Kopf		*B	380	250	*B	425	275	*B	370	240	85 55																																																																																																																																																																																																																																																				
SI über Kopf		*C	250	165	*C	270	175	*C	200	130	F _{max}																																																																																																																																																																																																																																																				
SI über Kopf		*C	235	155	*C	205	135	*C	210	135	M F																																																																																																																																																																																																																																																				

Manuelles Handhaben von Lasten (pro Schicht)										Lasten			
Lastgewichte [kg] beim Umsetzen (Heben / Absetzen), Tragen und Halten sowie Ziehen und Schieben													
+	Umsetzen, Tragen & Halten	Männer (Kg)	3	10	15	20	25	30	35	≥40			
		Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25			
		Frauen (Kg)	2	5	7	10	12	15	20	≥25			
		Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25			
+	Ziehen und Schieben	M1 Karren	Männer (Kg)	<50	75	100	150	200	≥250				
		Frauen (Kg)	<40	60	80	115	155	≥195					
		M2 Trolleys und Transportwagen	Männer (Kg)	<50	75	100	150	250	350	≥550			
		Frauen (Kg)	<40	60	80	115	195	270	≥425				
		M3 Schienenwagen, Hubwagen	Männer (Kg)	<50	75	150	250	350	500	600	800	≥1250	
		Frauen (Kg)	<40	60	115	195	270	385	460	615	≥960		
Lastpunkte			Transportmittel										
			0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8		
Körperhaltung, Position der Last (charakteristische Körperhaltung wählen)													
+	Oberkörper aufrecht und nicht verdreht, Last am Körper	geringes Rumpfeigen oder -drehen; Last am Körper oder körpermah			tiefes Beugen oder weites Vorneigen; geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers; Last körpermah o. über Schulterhöhe				Asymmetrische Körperhaltungen (Rumpf weit nach vorne beugen und verdrehen; Last körperfern; eingeschränkte Haltungsverstabilität beim Stehen oder Hocken) oder kniend				
		Haltungspunkte			1				8				
Ausführungsbedingungen (nur bei Ziehen und Schieben von Wagen)													
(+)	sehr geringer Rollwiderstand	Wagen ziehen/schieben auf glattem Boden	auf rauem Boden, über kleine Fugen/Kanten	auf Riffelblech, in/aus Gleis bzw. Spur	Wagen müssen b. Anfahren losgeriss werden, stark beschädigter Fahweg							sehr hoher Rollwiderstand	
	Ausführungspunkte	0	1	3	5	6							8
Häufigkeit der Lastenhandhabung [Häufigkeit/Schicht], Haltedauer [min/Schicht] oder Wegstrecke [Meter/Schicht]													
x	Häufigkeit (#) Umsetzvorgänge / Ziehen & Schieben kurz	5	25	120	350	750	1000	1500	2000	2500	≥3000		
	Haltedauer [min]	2,5	10	37	90	180	≥240						
	Strecke (Tragen, Ziehen & Schieben lang) [m]	300	650	2500	6000	12000	≥16000						
Dauerpunkte		1	2	4	6	8	10	11	13	14	15		
Manuelles Handhaben von Lasten (Ergebnis)													
19	(Last + Haltung + (Ausführung)) × Dauerpunkte	Umsetzen 1)	(3,30 + 1,5)	(3,30 + 1)	() +)	() + +)	Zieh- & Schieb kurz 1)	() + +)	Zieh- & Schieb lang 1)	() + +)	() + +)		
		x	1,05	= 5,04	x 4,33	= 5,74	x	=	x	=	x	=	
Handhaben Lasten = Σ Zeile 19		1) Summe der Dauerpunkte für Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen & Schieben maximal = 15									11		

Abb. E34: EAWs zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens – Seite 3 von 4




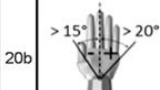
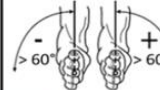
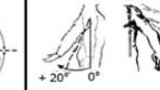
Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.6																												
Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten															Obere Extremitäten													
Kraft & Häufigkeit & Griff (FFG)															Anzahl der realen Aktionen pro Min. bzw. Anteil stat. Aktionen (zu betrachten ist die am meisten belastete Extremität)													
  		%SA = % Statische Aktionen					%DA = 100% - %SA					FDS = Kraft-Dauer - Punkte für statische Aktionen					FFD = Kraft-Häufigkeit - Punkte für dynamische Aktionen											
		GS' = Modifi. Griffpunkte für statische Aktionen (Griff × %SA)					GD = Griffpunkte für dynamische Aktionen					%FLS = Prozentsatz der statischen Aktionen im Kraftniveau					%FLD = Prozentsatz der dynamischen Aktionen im Kraftniveau											
		SC = Statischer Anteil					DC = Dynamischer Anteil					FDGS = Summe der statischen Anteile					FFGD = Summe der dynamischen Anteile											
		Berechnung stat.					Statische Aktionen (s/min)					Greifbeding.					Dynamische Aktionen (reale Akt./min)					Berechnung dyn.						
		Kraft [N]		FDS	GS'	%FLS	SC	≥45	30	20	10	5	3	0	2	4	2	10	15	20	25	30	35	≥40	FFD	GD	%FLD	DC
0 – 5	1	0	63,33	0,63	1	1	0	0	0	0	0	abc			0	0	0	1	2	3	4	7	2,67	0	18,45	0,25		
> 5 – 20					4	2	1	1	0	0	0	ab	bc		0	0	1	2	3	4	6	9	4,67	0	5,07	0,12		
> 20 – 35					7	5	3	2	1	1	1	ab	b	c	0	1	2	3	4	6	8	12	3,34	2	8,07	0,43		
> 35 – 90					11	8	5	3	2	1	1	a	b	b	1	2	3	5	7	9	12	18	4,67	0	5,07	0,24		
> 90 – 135					16	11	7	4	3	2	2	a	ab	b	2	3	5	7	9	12	15	24						
> 135 – 225					21	14	10	6	4	3	3	a	a	b	4	5	6	8	11	14	20	32						
> 225 – 300					28	18	12	8	5	4	4	a	a	b	5	6	7	9	12	16	26	40						
20a	FDGS = ∑ SC _i		0,63		FFG = FDGS + FFGD					1,57					%DA = ∑ FLD _i					FFGD = ∑ DC _i					36,67		0,94	
Hand- / Arm- / Schulterhaltungen (Zeitanteil der ungünstigsten Haltung von Handgelenk/Ellbogen/Schulter berücksichtigen)																												
Handgelenk (Rad/ul., Flex/Exten) Ellbogen (Pronation/Supin., Flex/Exten) Schulter (Flexion/Extension, Abduktion)																												
  																												
> 15° > 20° > 45° > 45° > 60° > 60° > 60° + 20° 0° + 45° + 80° Bei Aktionen auf oder über Schulterhöhe ohne Abstützung oder mit ungünstiger Körperhaltung Punkte verdreifachen!																												
Haltungspunkte: 10% 0, 25% 0,5, 33% 1, 50% 2, 65% 3, ≥85% 4, 0 PP																												
Zusatzfaktoren																												
Ungeeignete Handschuhe (welche die Handhabung beeinträchtigen) müssen für über die Hälfte der Zeit verwendet werden 2 <input type="checkbox"/> Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge mindestens 2 Mal pro Minute (z. B. Hämmern auf harter Oberfläche) 2 <input type="checkbox"/> Arbeitsbewegungen implizieren Rückschläge (Hand wird als Werkzeug benutzt), mindestens 10 Mal pro Stunde 2 <input type="checkbox"/> Arbeit bei Kälte oder Kühlung (unter 0° C), über die Hälfte der Zeit oder mehr 2 <input type="checkbox"/> Arbeit mit vibrierenden Werkzeugen, über ein Drittel der Zeit oder mehr 2 <input type="checkbox"/> Verwendung von stark vibrierenden Werkzeugen 4 <input type="checkbox"/> Die verwendeten Werkzeuge verursachen Kompressionen der Haut (Rötungen, Schwielen, Blasen etc.) 2 <input type="checkbox"/> Präzisionsaufgaben (Aufgaben mit einer räumlichen Genauigkeit von < 2-3 mm), über die Hälfte der Zeit oder mehr 2 <input type="checkbox"/> Zwei oder mehr Zusatzfaktoren treten gleichzeitig und über die ganze Zeit hinweg auf 3 <input type="checkbox"/> Zusatzfaktorenpunkte (den höchsten auftretenden Wert wählen) = 0 AF																												
Dauer der repetitiven Tätigkeiten																												
Nettodauer [min/Schicht] < 60 90 180 300 420 480 Schichtpunkte (1 Stunde = 1 Punkt) 1 1,5 3 5 7 8 Arbeitsorganisation: Arbeitsunterbrechungen jederzeit möglich (Zykluszeit von mehr als 10 min) Unterbrechungen möglich innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen (Zykluszeit zwischen 1 und 10 min) Unterbrechungen führen zu Prozessunterbrechung (kürzere Zykluszeit von 1 min) Organisationspunkte 0 1 2 3 4 5 6 ≥7 Pausen (≥ 8 min) [# /Schicht] 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 Pausenpunkte Zykluszeit ≤ 30 s Zykluszeit > 30 s Dauerpunkte = 0,5 DP																												
Gesamtbewertung der Belastung der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten																												
20 ((1,57 FFG + 0 PP + 0 AF) × 0,5 DP = 1 Obere Extremitäten)																												

Abb. E35: EAWS zur gewichteten Risikoabschätzung der Arbeitsaufgabe – Durchführung eines Rüstprozesses an der „Wafios RBV35“-Biegemaschine mithilfe der HoloLens – Seite 4 von 4

Ein steigender Bedarf an kundenindividuellen Produkthanforderungen bedingt eine erhöhte Anzahl von industriellen Rüstprozessen an Fertigungsmaschinen – insbesondere bei kleinen und mittelständischen Unternehmen aufgrund der vornehmlich manuell ausgeführten Rüstvorgänge. Auf Grundlage einer umfassenden ethnographischen Studie wurde zur Unterstützung von Maschineneinrichtern im Zuge derartiger komplexer und wissensintensiver Prozesse ein auf Augmented Reality (AR) basierendes Cyber-Physisches Produktionssystem (CPPS) unter Berücksichtigung interaktions-ergonomischer und kompatibilitätsbezogener Standards entwickelt. Für eine ganzheitliche, objektive und subjekt-bezogene arbeitswissenschaftliche Analyse zum Umgang mit AR-basierten CPPS am Beispiel von Rüstvorgängen an Umform- bzw. Biegemaschinen wurden zusätzlich zu einer Gefährdungsbeurteilung des Arbeitsprozesses ergonomische Teilstudien zur vergleichenden Untersuchung einer instruktionsgestützten Arbeitsausführung mithilfe der Mixed-Reality-Datenbrille Microsoft® „HoloLens“ und einer papierbasierten Arbeitsanweisung durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass muskuläre Ermüdungserscheinungen des Hals-Nackenschulter-Bereiches in Folge der Nutzung der HoloLens zwar möglich, in Bezug auf den Realkontext jedoch durch einen geringen Beanspruchungsgrad unwahrscheinlich sind. Ein an den Auflagestellen der Datenbrille feststellbarer signifikanter Temperaturanstieg stellt allerdings ein potenzielles Risiko für das thermische Wohlbefinden des Anwenders dar. Eine sensorische Unterstützung manueller Rüstvorgänge gepaart mit einer einfachen System-Bedienbarkeit begünstigt einen prozesssichernden Mehrwert, eine kognitive Entlastung sowie einen Lerneffekt sowohl hinsichtlich der Arbeitsaufgabe als auch in Bezug auf den Umgang mit der Datenbrille und der Applikation. Inwieweit die Anwendung derartiger Unterstützungssysteme in der Praxis unter Berücksichtigung einer stetigen technologischen und ergonomischen Weiterentwicklung sowie einer interaktionsbezogenen Gewöhnung auch mittel- bis langfristig einen beanspruchungsminimalen Charakter aufweisen, ist fraglich.