

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 Elektromyographie	47
5.2.2 Muskelphysiologie	48
5.2.3 Physiologische Grundlagen zur Thermoregulation.....	51
5.3 Arbeitspsychologische Beanspruchungsermittlung.....	53
5.4 Verfahren zur ergonomischen Bewertung von Arbeit.....	55
5.4.1 Manuelle Lastenhandhabung.....	56
5.4.2 Körperhaltung	56
5.4.3 Aktionskräfte.....	57
5.4.4 Repetitive Tätigkeiten	57
5.4.5 Auswahl eines Arbeitsplatzbewertungsverfahrens.....	58
5.5 Interaktions-ergonomische Gestaltungsanforderungen und Kompatibilität	60
5.5.1. Menschbezogene Aspekte.....	61
5.5.2 Arbeitsmittelbezogene Aspekte	62
5.6 Ergonomische und praxisbezogene Studien zum Einsatz AR-basierter Datenbrillen.....	65
5.6.1. Physische Einflussfaktoren.....	66
5.6.2 Psychische Einflussfaktoren	67

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