

Schlussbericht - Kurzfassung

zu IGF-Vorhaben Nr. 19343 N

1 Thema

Echtzeitfähige und kamerabasierte Ergonomiebewertung und Maßnahmenableitung in der Montage (WorkCam)

2 Berichtszeitraum

01.04.2017 bis 30.09.2019

3 Forschungsvereinigung

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V.

4 Forschungseinrichtung(en)

1 IFA - Institut für Fabrikanlagen und Logistik

2 IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Stand der Technik	8
2.1	Ergonomie	8
2.2	Ergonomiebewertung	9
2.2.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	9
2.2.2	Methoden für die Bewertung von Ergonomie	9
2.3	Kamerabasierte Technologien zur Bewegungserfassung	11
2.4	Ableitung von Handlungsmaßnahmen bei Ergonomiebewertungen	14
2.4.1	Vorarbeiten zu kamerabasierten Technologien zur Bewegungserfassung	14
2.4.2	Maßnahmen zur ergonomischen Gestaltung der Arbeit	15
3	Darstellung der erzielten Projektergebnisse	17
3.1	Arbeitspaket 1: Planung des echtzeitfähigen, kamerabasierten EBS	18
3.2	Arbeitspaket 2: Konzeption und Detaillierung des EBS	21
3.3	Arbeitspaket 3: Technische Umsetzung des echtzeitfähigen, kamerabasierten EBS ..	32
3.4	Arbeitspaket 4: Validierung und Optimierung des Demonstrators unter Realbedingungen	40
3.5	Arbeitspaket 5: Projektkoordination und Transfer der Ergebnisse	45
4	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	46
5	Literaturverzeichnis	48

Abkürzungsverzeichnis

AAWS.....	<i>Automotive Assembly Worksheet</i>
ArbSchG.....	<i>Arbeitsschutzgesetz</i>
AWS.....	<i>Assembly Worksheet</i>
BGHM.....	<i>Berufsgenossenschaft Holz und Metall</i>
BGI.....	<i>Berufsgenossenschaftliche Information für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit</i>
BkB.....	<i>Bewertung körperlicher Belastung</i>
BMWi.....	<i>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie</i>
CBR.....	<i>Case Based Reasoning</i>
CMU.....	<i>Carnegie Mellon University</i>
CNN.....	<i>Convolutional Neural Network</i>
DCF.....	<i>Design Check</i>
DIN.....	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EAWS.....	<i>European Assembly Worksheet</i>
EBS.....	<i>Ergonomiebewertungssystem</i>
EN.....	<i>Europäische Norm</i>
ErgoKom.....	<i>Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiter*innenbelastungen in Kommissioniersystemen</i>
GVB.....	<i>Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik</i>
HHT.....	<i>Heben Halten Tragen</i>
HSV.....	<i>Hue Saturation Value</i>
IAD.....	<i>Institut für Arbeitswissenschaft Darmstadt</i>
ICPAME.....	<i>International Conference on Production Automation and Mechanical Engineering</i>
IFA.....	<i>Institut für Fabrikanlagen und Logistik</i>
IGES.....	<i>Institut für Gesundheits- und Sozialforschung</i>
IGF.....	<i>industrielle Gemeinschaftsforschung</i>
IPH.....	<i>Institut für Integrierte Produktion Hannover</i>
ISO.....	<i>international organization for standardization</i>
KMU.....	<i>kleine und mittlere Unternehmen</i>
LMM.....	<i>Leitmerkalmethode</i>
MA.....	<i>Manuelle Arbeit</i>
MLP.....	<i>Multi Layer Perceptron</i>
MTM-HWD.....	<i>Methods Time Measurement - Human Work Design</i>
NPW.....	<i>New Production Worksheet</i>
OCRA.....	<i>Occupational Risk Assessment of Repetitive Movements and Exertions of the Upper Limb</i>
OpenNI.....	<i>Open Natural Interaction Framework</i>
OWAS.....	<i>Oyako Working posture Analysis System</i>
PA.....	<i>projektbegleitender Ausschuss</i>
PLIBEL.....	<i>Plan för Identifiering av Belastningsfaktoror</i>
REBA.....	<i>Rapid Entire Body Assessment</i>
REFA.....	<i>Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation</i>
RULA.....	<i>Rapid Upper Limb Assessment</i>
SDK.....	<i>Microsoft Software Development Kit</i>
SFB.....	<i>Sonderforschungsbereich</i>
WPF.....	<i>Windows Presentation Foundation</i>
ZS.....	<i>Ziehen Schieben</i>
ZWF.....	<i>Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Bewertungsbogen des Rapid Upper Limb Assessment(RULA)	10
Abbildung 2: Einteilung der Ergonomiebewertungsverfahren in Anlehnung an WINKEL UND MATHIASSEN [Win94].....	23
Abbildung 3: Ausschnitt der Bewertungsmatrix unterschiedlicher Bewertungsverfahren für die Eignung zur kamerabasierten Ergonomiebewertung	24
Abbildung 4: Schaubild zur Gegenüberstellung winkelbezogener Grenzen der Flexion des Rückens und die Einordnung in Risikoklassen in Bezug auf die Normen ISO 11226, DIN EN 1005-4 und die Ergonomiebewertungsmethoden RULA, MTM-HWD, ERIN und WorkCam	25
Abbildung 5: Ergebnis der Bewertung des Montagevorgangs mit dem RULA-Verfahren.....	27
Abbildung 6: Ergebnis der Bewertung des Montagevorgangs mit dem WorkCam-EBS	28
Abbildung 7: Steckbrief aus dem Maßnahmenkatalog zur Verbesserung der Ergonomie am Arbeitsplatz.....	30
Abbildung 8: Nutzwertanalyse der konstruktiven Ausführung des Demonstrators.....	32
Abbildung 9: Verarbeitungsprozessfolge zur kamerabasierten Ergonomiebewertung und Maßnahmenableitung.....	34
Abbildung 10: Oben: Gegenüberstellung der Trainingsgüte zur Vorhersagegüte der entwickelten Modelle zur Skelettierung; unten: Inferenzzeit pro Bild nach Modell aufgeführt	36
Abbildung 11: Konstruktive Ausführung des WorkCam Demonstrators, a) transportfähiger Zustand, b) einsatzbereiter Zustand, α) Kinect 3D-Kamera, β) Teleskopstange zur translatorischen Einstellung der Kameraposition, γ) Laptop zur Ausführung der EBS-Software	38
Abbildung 12: Bildschirmfoto der EBS-Software im Einsatz, a) Bedienelement zum Starten der Ergonomieanalyse, b) Bedienelement zur Auswertung und Maßnahmenableitung, c) Ampel-Indikator zur momentanen Ergonomiebewertung, d) Bewertungsaufschlüsselung	39
Abbildung 13: Einbindung der Maßnahmenableitung in den Programmablauf	40
Abbildung 14: Durchführung von Evaluationsuntersuchungen in der IFA-Lernfabrik.....	42
Abbildung 15: Ausschnitt des Anwendungsleitfadens, hier gezeigt: Positionierung des Demonstrators und Einstellung der Kamera	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl von Verfahren zur Ermittlung und Bewertung von Belastungen auf Wirbelsäule und obere Extremitäten nach [Kug10b, Gol08, Gün14, Kel13]	10
Tabelle 2: Ausschnitt aus dem Lastenheft mit Anforderungen zur Bewegungsaufnahme und -erfassung.....	20
Tabelle 3: Gegenüberstellung verfügbarer Datensätze. *): Nur für Forschungszwecke, keine kommerzielle Verwertung; 1) keine kommerzielle Redistribution desselben Datensatzes, ansonsten freie kommerzielle Verwertung zugelassen	35
Tabelle 4: Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen	46

1 Zusammenfassung

Jährlich erkrankt ein beträchtlicher Anteil von Arbeitnehmern als direkte Folge ihrer Arbeitstätigkeit. Laut einer Erhebung des Bundesamts für Statistik, durchgeführt im Jahre 2014, fällt dabei ein Anteil von 23 % der Erkrankungen auf das Muskel-Skelettsystem zurück [BMW17]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt eine 2018 veröffentlichte Studie des Instituts für Gesundheits- und Sozialforschung (IGES Institut GmbH), in der ein Anteil von rund 22 % der Erkrankungen bei Arbeitsunfähigkeit in den Jahren 2011 - 2017 auf das Muskel-Skelettsystem zurückzuführen sind [DAK18]. Da Erkrankungen des Muskel-Skelettsystems mit Abstand der Hauptgrund für Arbeitsunfähigkeit ist, besteht großes Handlungspotential in diesem Bereich.

Die Ergonomiebewertung von Arbeitsplätzen wird zurzeit oftmals von Ergonomieberater*innen bzw. Physiotherapeut*innen durchgeführt. Die eingesetzten Methoden sind, auch wenn diese inzwischen mit digitalen Hilfsmitteln, d. h. mit Tablet-Computern und Excel-Sheets anstelle von Papier und Bleistift durchgeführt werden, weiterhin analoge Methoden. Die Beurteilung und Einschätzung diskreter Arbeitsabläufe obliegt dem/der Ergonomieberater*in, wodurch die durchgeführte Bewertung von diesem abhängig ist. Ein weiteres Problem der bisher verfügbaren, konventionellen Ergonomiebewertungsmethoden ist oftmals die mangelnde ökonomische Verfügbarkeit des Einsatzes o. g. Methoden bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Des Weiteren sind die einzuleitenden Maßnahmen zur Abstellung unergonomischer Arbeitsabläufe auf die Expertise der Ergonomieberater*innen begrenzt. Gleichzeitig ist die Einsatzfähigkeit der Mitarbeiter*innen gerade für KMU von zentraler Bedeutung, da es häufig an Kapazitäten zum Ausgleich von Ausfällen mangelt.

Das Ziel des IGF-Vorhabens 19343 „*WorkCam*“ war daher die Entwicklung und Untersuchung einer echtzeitfähigen, kamerabasierten Ergonomiebewertung mit Maßnahmenableitung in der Montage in Form eines Demonstrators. Mit einer auf Montageprozesse zugeschnittenen Maßnahmenableitung erhalten KMU die Möglichkeit, unergonomische Arbeitsweisen zu identifizieren. In einem weiteren Schritt werden KMU anwendungsspezifische Maßnahmen vorgeschlagen, sodass diese auf unergonomischen Arbeitsweisen reagieren und diese abstellen können.

Im Rahmen der Durchführung des Forschungsprojekts wurde ein transportfähiger Demonstrator konstruiert und gebaut sowie ein Softwaredemonstrator in C# mit dem Microsoft Kinect Software Development Kit entwickelt, um die mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) definierten Anforderungen in einen Demonstrator zu überführen. Da aktuell kein kostengünstiges und aufwandsarmes Kamerasystem vorhanden ist, das einem/r Mitarbeiter*in der Montage zum einen

automatisiert und in Echtzeit Rückmeldung zu nicht ergonomischen Bewegungsabläufen gibt (bspw. in Form von grafischen Darstellungen und akustischen Warntönen) und zum anderen darauf aufbauend mögliche Potentiale und Handlungsmaßnahmen für geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Muskel-Skelett-Erkrankungen ableitet, waren dies zentrale Anforderungen an das Projekt. Um darüber hinaus eine möglichst weitreichende Anwendung zu gewährleisten, sollte das System uneingeschränkt auf alle Personengruppen ungeachtet ihrer Anthropometrie eingesetzt werden können. Neben der konstruktiven und programmtechnischen Umsetzung erfolgte zudem die Entwicklung einer auf die Anforderungen und Restriktionen der ausgewählten Kameratechnologie angepasste Bewertungsmetrik sowie eines Maßnahmenkatalogs, welche programmtechnisch in den Softwaredemonstrator integriert wurden.

Durch die Evaluation des Demonstrators konnte dessen zugrunde liegende Programmierung weiter auf die Restriktionen der Kameratechnologie angepasst werden. Die Ergonomiebewertung sowie die anschließende Maßnahmenableitung wurden von der Benutzerführung so einfach wie möglich ausgeführt und während der Evaluation kontinuierlich optimiert.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Stand der Technik

2.1 Ergonomie

Der Begriff Ergonomie wird aus den griechischen Wörtern ergon = Arbeit und nomos = Gesetz abgeleitet [Sch18, Rüh04, Bul94]. Ebenfalls kann unter dem Begriff die Beziehung des Menschen zu seiner technischen Umwelt verstanden werden, welche das Ergebnis der Nutzung von Arbeitsmitteln ist. Das Ziel dabei ist, eine Anpassung an die Arbeitsbedingungen zu schaffen, welche die Umweltbedingungen und die Arbeitsaufgabe an die Fähigkeiten des Menschen koppelt [Wie14].

Die Ergonomie bildet ein Teilgebiet der Arbeitswissenschaft mit zahlreichen Einflussgrößen. Die auf den Körper wirkende Belastung kann in ein sogenanntes Arbeitssystem eingebettet werden [Lau92]. In dem Arbeitssystem nach KUGLER, LANGE & WINDEL sowie BONGWALD gibt es festgelegte Anforderungen an eine Tätigkeit, wobei bestimmte Eigenschaften des Menschen vorausgesetzt werden [Kug10a, Lan17, Bon95]. Diese Eigenschaften beinhalten sowohl körperliche Merkmale (Maße, Gewicht und individuelle Gegebenheiten wie Alter, Erfahrung etc.), als auch körperliche und geistige Fähigkeiten (bspw. Informationsaufnahme, Leistungsfähigkeit). Zusammen mit den Belastungen der Tätigkeit bilden die Eigenschaften die Beanspruchung auf z. B. Gelenke und Muskeln. Bei einer zu hohen Beanspruchung kann die Gesundheit geschädigt und die Leistung vermindert werden [Kug10a, Bon95, Lau92].

In der DIN EN ISO 6385: 2016 [DIN16] wird die Ergonomie ebenfalls in Zusammenhang mit dem Arbeitssystem gebracht. Dabei wird der Arbeitsplatz durch den im Mittelpunkt des Systems stehenden Menschen, den Arbeitsmitteln und dem Arbeitsgegenstand gebildet. Einen sehr ähnlichen Ansatz verfolgt auch BULLINGER. Dieser berücksichtigt außerdem sich auf das System auswirkende Umwelteinflüsse und Eingangsgrößen, die in Kombination mit dem System die Ausgabe ergeben [Bul94]. Die Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) griff diesen Ansatz in ihrer Veröffentlichung zum Thema Ergonomie und Arbeitsplatzgestaltung auf [[BGHM].

Aufgrund des stetig steigenden Anteils der älteren Bevölkerung, dem gleichzeitigen Fachkräftemangel [Gro19] und der zunehmenden Erhöhung der Krankenstände in Unternehmen der letzten Jahre [Mar19] gewinnt das Thema Ergonomie immer mehr an Bedeutung in der Arbeitsplatzgestaltung [Lat13]. Vor allem Muskel-Skelett-Erkrankungen zählen zu den häufigsten Ursachen von länger andauernden Personalausfällen in der Industrie [Mar19]. Diesen Erkrankungen kann mit einer ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung entgegengewirkt werden [Lat13]. Ergonomische Arbeitsplätze sind die Voraussetzung, um körperlichen Beeinträchtigungen der Mitarbeiter*innen sowohl kurz- als auch langfristig vorzubeugen [Gro19]. Das Ziel der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung kann damit sowohl als Optimierung der

Arbeitsgestaltung hinsichtlich der Fähigkeiten und der Beschränkungen von Menschen als auch der Verbesserung der Leistung des Gesamtsystems verstanden werden.

2.2 Ergonomiebewertung

2.2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Ergonomie und die damit verbundene Prävention von Muskel-Skelett-Erkrankungen nimmt aufgrund des größer werdenden Anteils an älteren Beschäftigten einen immer wichtigeren Stellenwert in der Gesellschaft und der Arbeitsplatzgestaltung ein. Arbeitsbedingten Gesundheitsrisiken soll durch „Maßnahmen der menschengerechten Gestaltung der Arbeit“ [§2 ArbSchG] vorgebeugt werden. Die Pflichten des Arbeitgebers sind in §§3-6 im Arbeitsschutzgesetz aufgelistet. Es gibt zudem auf der deutschen (DIN), europäischen (EN) und internationalen (ISO) Ebene eine Vielzahl an Normen zur ergonomischen Gestaltung von Arbeitssystemen, beispielsweise bezüglich der Arbeitsmittel und des Arbeitsplatzes [Lan17]. Einen grundlegenden Rahmen bietet die DIN ISO 6385. Sie vereinheitlicht die Grundsätze der Ergonomie und zeigt einen Leitfaden für eine humane und wirtschaftliche Arbeitsplatzgestaltung auf. Ergänzend dazu werden in der DIN EN 1005 die Anforderungen für die Sicherheit von Maschinen sowie die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen in Bezug auf manuelle Handhabung, empfohlene Kraftgrenzen und Risikobewertungen für kurzzyklische Tätigkeiten beschrieben. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der DIN EN 1005-4. In dieser Norm geht es um die Bewertung von Körperhaltungen und Bewegungen bei der Arbeit an Maschinen.

2.2.2 Methoden für die Bewertung von Ergonomie

Nach REFA sind fehlerhafte und ineffiziente Bewegungsabläufe Indikatoren für eine nicht ergonomische Arbeitsplatzgestaltung [REFA16]. Folglich stellt das Identifizieren und Bewerten dieser Indikatoren die Grundlage für eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung dar. Neben den gesetzlichen Normen wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl Screening-Methoden entwickelt, die bei der Bewertung von Arbeitsplätzen nach ergonomischen Gesichtspunkten unterstützen können. Diese praxisorientierten Methoden lassen sich unter anderem in Methoden zur Ermittlung von Belastungen auf die Wirbelsäule und von Belastungen auf die oberen Extremitäten einteilen, wie in Tabelle 1 verdeutlicht. Viele dieser Methoden sind als "Papier- und Bleistiftmethode" konzipiert. Der Vorteil solcher Methoden ist die einfache Ausführbarkeit, die zum Großteil auch ohne weitere Hilfsmittel möglich ist. Trotzdem ist für die meisten der Methoden noch eine Person notwendig, welche die Daten aufnimmt und auf Basis dessen eine Bewertung durchführt. Die manuelle Aufnahme und Auswertung der Daten ist jedoch oftmals durch Subjektivität geprägt und erfordert im Regelfall viel Erfahrung [Gün14, Grö12].

Tabelle 1: Auswahl von Verfahren zur Ermittlung und Bewertung von Belastungen auf Wirbelsäule und obere Extremitäten nach [Kug10b, Gol08, Gün14, Kel13]

Verfahren zur Ermittlung und Bewertung von Belastungen auf die Wirbelsäule	Verfahren zur Ermittlung und Bewertung von Belastungen auf die oberen Extremitäten
<ul style="list-style-type: none"> • Ovako Working posture Analysis System (OWAS) [Kar77, Sto85] • National Institute for Occupational Safety and Health [NIO81, Wat93, Wat94] • REFA-Verfahren [REFA91] • Leitmerkalmethode Heben, Halten Tragen (LMM-HHT) und Leitmerkalmethode Ziehen, Schieben (LMM – ZS) [Caf99], [Ste89] • DIN EN 11226 [DIN00] • ISO 11228-1 [ISO03] und ISO 11228-2 [ISO07a] • DIN EN 1005-2 [DIN09b] • European Assembly Worksheet (EAWS) [Sch07, Sch10a] • Automotive Assembly Worksheet (AAWS) [Sch04a] • Assembly Worksheet (AWS) light [Kug10b] • Multiple-Lasten-Tool [Sch10b] • Methods Time Measurement - Human Work Desgin 2015 [MTM17] • Design Check (DCF) [Sch02] • New Production Worksheet (NPW) [Sch04b] 	<ul style="list-style-type: none"> • Rapid Upper Limb Assessment (RULA) [McA93] • Health and Safety Executive [HSE02] Health and Safety Executive [HSE07] • Job Strain Index [Moo95] • DIN EN 33411-5 [DIN99] • Occupational Risk Assessment of Repetitive Movements and Exertions of the Upper Limb (OCRA) [Col02] • Occupational Risk Assessment-Checkliste (OCRA – Checkliste) [Col02] • DIN EN 1005-3 [DIN09c] und DIN EN 1005-5 [DIN07] • ISO 11228-3 [ISO07b] • Bewertung körperlicher Belastung (IAD-BkB) [Ghe07] • Leitmerkalmethode Manuelle Arbeit (LMM-MA) [Ste07] • Automotive Assembly Worksheet (AAWS) [Sch04a] • BGI 504-46 [DGU09] / BGI 7011 [DGU07] • Methods Time Measurement - Human Work Desgin 2015 [MTM17] • Design Check (DC) [Sch02] • New Production Worksheet (NPW) [Sch04b]

Typische Verfahren, die häufig Verwendung finden, sind die OCRA-Checkliste, die Leitmerkalmethoden (LMM) und das Rapid Upper Limb Assessment (RULA). Bei allen Verfahren werden die Körperteile situationsbezogen ihrer Haltung entsprechend bewertet. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt des RULA-Verfahrens. Dargestellt ist die Bewertung der Haltung des Oberkörpers.

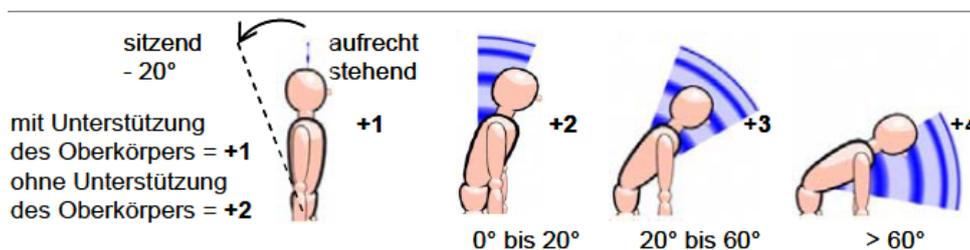


Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Bewertungsbogen des Rapid Upper Limb Assessment(RULA)

Es wird unterschieden zwischen vier verschiedenen Positionen, welche jeweils mit einer bestimmten Punktzahl von eins bis vier versehen sind. Wird nun die Haltung in einer bestimmten Situation bewertet, wird der Wert für den Oberkörper mit weiteren Werten für die anderen Körperteile addiert. Es ergibt sich eine Gesamtpunktzahl für die Haltung des ganzen Körpers, die

dann Aufschluss über die Güte der Haltung gibt. Je nach Verfahren ist diese in verschiedene Stufen eingeteilt, die Aufschluss über die Ergonomie am betrachteten Arbeitsplatz geben. Es handelt sich jedoch lediglich um eine Momentaufnahme und keine ganzheitliche Bewertung des Arbeitsplatzes über die gesamte Zeit der Schicht hinweg. Bei einer analogen Bewertung durch eine/n Ergonomieexpert*in bedeutet dies außerdem, dass diese/r mindestens eine ganze Schicht entweder vor Ort oder als Videoaufzeichnung beobachten muss, um sicherzustellen, dass kritische Haltungen auch entdeckt werden. Für gewöhnlich werden deshalb nur Haltungen bewertet, bei welchen vermutet wird, dass diese kritisch sind, was nicht zu einer ganzheitlichen Bewertung führt [McA93].

2.3 Kamerabasierte Technologien zur Bewegungserfassung

Die meisten Systeme zur Ergonomiebewertung nutzen Sensoren, die am Körper getragen werden müssen [Sch14]. Motion Capturing Systeme, die auf Sensoren basieren, werden zumeist bei der Bewertung von Ergonomie zur Erfassung der Arbeitshaltungen genutzt [Vis18]. Beim elektromechanischen Motion Capturing wird ein Exoskelett über den Körper gelegt und die Bewegungsdaten des Menschen werden am Computer ermittelt und aufgezeichnet. Ein großer Nachteil ist, dass die Kalibrierung des Skeletts mit einem hohen Zeitaufwand verbunden ist und die Mitarbeiter*innen durch das Skelett in seinen Bewegungen stark eingeschränkt sind, wodurch die Bewertung der Ergonomie am Arbeitsplatz verfälscht werden kann. Bei elektromagnetischen Systemen wird die Bewegung des Menschen über eine Veränderung des Magnetfelds aufgezeichnet. Diese Systeme sind bei KMU in der Montage aufgrund vieler Hindernisse wie bspw. in der Umgebung vorhandene Metalle, die das Ergebnis der Bewegungserfassung beeinflussen, schwierig umsetzbar. Beim Inertial Motion Capturing wird die Bewegung der Person mit Hilfe der Massenträgheit erfasst und die Geschwindigkeit eines sich bewegenden Körperteils durch Beschleunigungsmesser bestimmt. Diese Systeme müssen regelmäßig neu kalibriert werden, wozu in KMU meist die Zeit fehlt und Systeme dieser Art in ihrer Technologie noch nicht vollständig ausgereift sind [Pos08, Vis18, Xse18].

Bei optischen Motion Capturing Systemen werden Bewegungen über Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen. Dabei wird zwischen optischen Systemen mit Markern und solchen ohne unterschieden [Vis18].

Bei Systemen mit Markern wird die Körperhaltung und Bewegung mit Hilfe von Markierungspunkten auf einem Motion Capturing Anzug durch Kameras aufgezeichnet. Die Positionen der Markierungen im Raum werden durch Triangulation am Computer rekonstruiert und resultieren in einem dreidimensionalen Bewegungsmodell [Vis18].

Dabei wird zwischen aktiven und passiven Markern unterschieden. Passive Marker sind mit reflektierendem Material überzogen und werfen das Licht zurück, welches von lichtempfindlichen Kameras eingefangen wird. Aktive Marker senden infrarotes Licht aus, welches von den Kameras

erfasst wird. Dabei können sowohl einzelne als auch mehrere Personen gleichzeitig aufgenommen werden. Aufgrund des hohen Datenaufkommens entsteht hierbei jedoch eine hohe Verarbeitungszeit bei der Nachbearbeitung. Außerdem sollte die Montageumgebung frei von zu starker Sonneneinstrahlung und Erschütterungen sein. Solche Umgebungsbedingungen sind in der Montage selten möglich und somit in der Praxis kaum umsetzbar. Weitere Probleme gibt es, wenn Marker verdeckt sind oder zeitweise direkt nebeneinanderliegen, da die Bewegung nicht vollständig aufgezeichnet werden kann. Außerdem ist die initiale Kalibrierung bzw. Rekalibrierung der Marker sehr zeitaufwendig und die Anschaffungskosten sehr hoch. Dafür fehlt es KMU oftmals an zeitlichen und finanziellen Ressourcen [Pos08, Xse18, Vis18]. Bei den markerlosen Motion Capturing Systemen wird versucht, die Silhouette des Menschen ohne Vorrichtungen am Körper in Einzelbildern zu erfassen. Dadurch kann sich der Mensch nahezu frei bewegen. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze, jedoch bisher kein stabiles System, welches in der Montage genutzt werden kann. Eine Möglichkeit ist die Silhouette mit Hilfe von Infrarot-Filtern zu erkennen. Dafür wird infrarotes Licht auf eine Leinwand gestrahlt und der sich bewegende Mensch blockiert das Licht. Die Analyse der Bilder kann in Echtzeit bei geringem Aufwand erfolgen, da nur eine Kamera, Leinwand und Lichtquelle benötigt wird. Allerdings ist der Bewegungsraum auf der Leinwand beschränkt und andere Gegenstände der Montage können den Schatten beeinflussen. Problematisch ist diese Art der Anwendung jedoch vor allem, wenn die Umgebung des/der Mitarbeiters*in sehr dynamisch ist. Des Weiteren ist eine Analyse der Bewegungen bei der genannten Methode nur im zweidimensionalen Raum möglich. Eine andere Möglichkeit besteht in dem Erkennen der Silhouette mit Hilfe von anatomischen Daten. Hierbei sind jedoch die Ergebnisse ungenauer als bei Systemen mit Markern, da u. a. die Positionen der Gelenke nicht kontinuierlich präzise erfasst werden [Pos08, Vis18].

Ende 2013 formulierten zwei Forscher vom Unternehmen Google, TOSHEV & SZEGEDY die zweidimensionale Posenerkennung bzw. -schätzung als ein Convolutional Neural Network (CNN) basiertes Regressionsproblem für Joints (engl. Gelenke) [Tos13]. CNN sind eine spezielle Klasse von neuronalen Netzwerken, die insbesondere im Bereich der Bildverarbeitung verwendet werden. Die von LECUN ET AL. eingeführten CNN sind eine Erweiterung des Multi Layer Perceptron (MLP), welche versuchen, den biologischen, visuellen Cortex zu imitieren [LeC89]. DeepPose ist in der Literatur für die Schätzung der humanen Pose die erste publizierte Arbeit, die ein CNN auf diese Problemstellung angewendet hat. Es ist ein holistisches Modell, das die Schätzung der menschlichen Körperhaltung als gemeinsames Regressionsproblem formuliert und das grafische Modell oder die Teildetektoren für die menschliche Posenschätzung nicht explizit definiert. Holistische Modelle neigen zu Ungenauigkeiten in hochpräzisen Regionen, aufgrund der Schwierigkeit, die direkte Regression komplexer Posenvektoren aus Bildern zu erlernen.

Der Ansatz von TOMPSON ET AL. erzeugt Heatmaps, d. h. für jeden Joint diskrete Positionswahrscheinlichkeiten im Bildraum, um gleichzeitig Merkmale in unterschiedlichen Skalen zu erfassen [Tom14]. Das verwendete Coarse-Heatmap-Modell gibt für jeden Joint eine Heatmap aus, die die Wahrscheinlichkeit pro Pixel für die Verbindung beschreibt, die an jeder räumlichen Ausgangsposition auftritt. Aus dem Modell lässt sich schlussfolgern, dass Heatmap-basierte Ansätze innerhalb der zweidimensionalen Posenschätzung im Vergleich zu direkten Regressionen der Joint-Positionen eine höhere mittlere Genauigkeit erreichen.

Das erste eingeführte Modell der dreidimensionalen Posen abschätzenden CNN-Architekturen wurde 2013 von JI ET AL. vorgestellt und angewendet, um humane Aktionen in realer Umgebung zu detektieren [Ji13]. Das resultierende dreidimensionale CNN ist hinsichtlich der Relevanz nur als Grundmodell für weitere Ansätze zur Erkennung der humanen dreidimensionalen Pose zu bewerten. Die Architektur zeigt keine hohe Leistung und wurde nur mittels obsoleter Evaluationsmetriken bewertet.

Einen weiteren Ansatz, die dreidimensionale Pose eines Menschen zu detektieren, stammt von METHA ET AL. [Meh17]. Es wird eine echtzeitfähige Methode präsentiert, welche die dreidimensionale Pose mittels einer einzigen RGB-Kamera detektiert. Basierend auf ihren Ergebnissen zeigen die Autoren, dass geringe Ungenauigkeiten der monokularen RGB-Kameras zu sehr unterschiedlichen Tiefenschätzungen führen können und sich in unterschiedlichen Darstellungen der Heatmaps widerspiegeln. Als Hauptproblematik wird weiterhin die begrenzte Verfügbarkeit an ausreichend annotierten dreidimensionalen Datensätzen zur Posendetektion genannt. Selbst aktuelle, aus realen Umgebungen aufgenommene Datensätze, haben ein entsprechend unterschiedliches Aussehen oder Verzerrungen im Hintergrund.

2017 zeigten MARTINEZ ET AL. in ihren wissenschaftlichen Untersuchungen, dass eine Angabe der zweidimensionalen Joint-Positionen im Rahmen ihrer Arbeiten ausreicht, um eine dreidimensionale Pose zu rekonstruieren [Mar17]. Die Forscher beschränken sich dabei vollständig auf die dreidimensionale Rekonstruktion der Pose und nicht auf die Detektion der Joint-Positionen im zweidimensionalen Bild. Ihr Modell ist dabei als nachgelagertes Modell komplementär zu einer möglichen zweidimensionalen Posendetektion konzipiert. Sie merken an, dass ihr Modell am besten mit von Hand annotierten zweidimensionalen Joint-Positionsdaten funktioniert und bekräftigen, dass das Modell invariant gegenüber einer Anzahl verschiedener sowohl technischer Faktoren wie z. B. unterschiedlicher Bildhintergründe und variierender Beleuchtungssituationen als auch menschlicher Faktoren wie Hautfarbe, Körperbau und Kleidung sein müsse.

ZHOU ET AL. schlagen als einen neuartigen Ansatz vor, die dreidimensionale Pose des Menschen zu erkennen [Zho17]. Im Gegensatz zu METHA ET AL. und MARTINEZ ET AL. implementieren die Autoren keinen zweistufigen Ansatz, der sequenziell die zweidimensionalen Joint-Positionen schätzt und anschließend die dreidimensionale Pose wiederherstellt, sondern schlagen ein End-

to-End-Modell vor [Meh17, Mar17]. Das Ziel hierbei ist das Ausnutzen der Korrelation zwischen den Unteraufgaben der zweidimensionalen Pose und der Tiefenschätzung durch ein zusätzliches Depth-Modul im Modell.

2.4 Ableitung von Handlungsmaßnahmen bei Ergonomiebewertungen

2.4.1 Vorarbeiten zu kamerabasierten Technologien zur Bewegungserfassung

Für Ergonomieuntersuchungen existieren erste Systeme, bei denen die Bewertung rein über Kameradaten vorgenommen wird, bspw. zur Evaluation der physischen Belastung bei der Ausübung von Freihandgesten mittels dreidimensional abbildender Kameras (fortführend 3D-Kameras; wie z. B. Microsoft Kinect) [Hin14]. Jedoch werden bei den existierenden Systemen bislang nicht automatisch Handlungsmaßnahmen abgeleitet. Somit ist in jedem Fall eine Nachbereitung der erfolgten Analyse durch einen Ergonomieexperten notwendig, um die richtigen Schlüsse aus der Analyse zu ziehen und eine Verbesserung der Situation zu erwirken. Weiterhin sind diese Systeme nur in der Lage, entweder Ganzkörper-Bewegungen oder aber Bewegungen der Extremitäten (Hände oder Arme), zu beobachten. Um eine Ergonomiebewertung möglichst automatisiert durchführen zu können, bedarf es der Kombination aus Sensortechnologien und entsprechenden Bewertungsverfahren. Nachfolgend werden verschiedene Ansätze zur Ergonomiebewertung vorgestellt.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte und von der TU Dresden durchgeführte Kooperationsprojekt „PointCloud-4D – Entwicklung von Verfahren der automatischen 3D-Bewegungsanalyse auf Basis von 3D-Kameras“ (Förderkennzeichen: KF2522101SS9) hatte zum Ziel, eine Technologie zur automatisierten dreidimensionalen Erfassung von Körperzwangshaltungen am Arbeitsplatz und zur anschließenden automatischen Ableitung von Risikoklassen zu entwickeln [Grö12]. Als Sensor wurde eine Kinect Version 1 verwendet, welche jedoch nicht den industriellen Standards entspricht. Im Rahmen des Projektes werden zudem keine Potentiale oder Handlungsmaßnahmen abgeleitet, sodass der Anwender aufbauend auf den identifizierten Risikoklassen die Beurteilung der Arbeitsbedingungen und die Ableitung adäquater Potentiale und Gestaltungsmaßnahmen eigenständig vornehmen muss.

In dem vom BMWi geförderten IGF-Projekt „ErgoKom – Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiter*innenbelastungen in Kommissioniersystemen“ (Förderkennzeichen: 440 ZN) wurde eine Lösung zur Bewertung physischer Belastungen in Kommissioniersystemen entwickelt. Verschiedene Technologien zur Evaluation von Körperposen wurden für den Anwendungsfall bewertet. Ein Funktionsmuster eines Ergonomiebewertungssystems (EBS) wurde auf Basis einer 3D-Kamera in Kombination mit Inertialsensorik und einer Datenbrille entwickelt [Gün14]. Dieses System ist jedoch für eine

einwandfreie Funktionalität auf die Daten des Inertialsensors angewiesen. Das Forschungsvorhaben *WorkCam* unterscheidet sich vom Projekt ErgoKom insbesondere hinsichtlich der verschiedenen, in den Projekten verfolgten Ausrichtungen. Während ErgoKom den Fokus auf Kommissioniertätigkeiten legt, fokussiert *WorkCam* manuelle Montagetätigkeiten und die diesbezüglichen Bewegungen während des Montageprozesses. Darüber hinaus erfolgt in ErgoKom keine automatisierte und echtzeitfähige Ableitung von Handlungsmaßnahmen.

Im Teilprojekt C4 des Sonderforschungsbereichs "SFB 1026 – Sustainable Manufacturing" wurde ein System entwickelt, das auf Grundlage von Kamerabildern automatisch nicht ergonomische Körperhaltungen entdeckt und den Werker darauf aufmerksam macht. Fokus der Bestrebungen war es, den optimalen Grad der Automatisierung von Systemen zu ermitteln, welche die Zusammenarbeit von Handarbeit und Automatisierungstechnik ermöglichen [Krü15, Ngu15]. Hierbei wurde auf ein dreidimensionales Körpermodell zurückgegriffen. Auch in diesem Projekt ist keine automatische Potential- bzw. Maßnahmenableitung vorgesehen, die dem Werker entweder den richtigen Bewegungsablauf vermittelt, mögliche Potentiale hinsichtlich einer ergonomischeren Organisation des Arbeitsplatzes aufzeigt oder technische Hilfsmittel vorschlägt. Die Analyse der kombinierten Verfahren aus der Industrie und Forschung zeigt auf, dass im industriellen Umfeld bislang kein Verfahren existiert, welches den aufgezeigten Anforderungen der Unternehmen entspricht. Aktuell ist kein kostengünstiges und aufwandsarmes Kamerasystem vorhanden, das einem/einer Mitarbeiter*in der Montage zum einen automatisiert und in Echtzeit Rückmeldung zu nicht ergonomischen Bewegungsabläufen gibt (bspw. in Form von grafischen Darstellungen und akustischen Warntönen) und zum anderen darauf aufbauend mögliche Potentiale und Handlungsmaßnahmen für geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Muskel-Skelett-Erkrankungen ableitet.

2.4.2 Maßnahmen zur ergonomischen Gestaltung der Arbeit

Ergonomie lässt sich in Bezug auf ergonomische Arbeitsgestaltung in zwei sich ergänzende Teilgebiete einteilen: die Verhaltens- und die Verhältnisergonomie [Hei99].

2.4.2.1 Verhaltensergonomie

Die Verhaltensergonomie bezieht sich auf den/die Mitarbeiter*in im Arbeitssystem und stellt somit die individuelle Ebene der Ergonomie dar. Sie bezieht sich auf das Wissen des/der Mitarbeiters*in und wie er oder sie das angeeignete Wissen richtig umsetzt, damit ein schädigungsfreier Bewegungsablauf entsteht. Verhaltensergonomie beruht dabei auf einer Dreistufigkeit. Im ersten Schritt muss dem/der Mitarbeiter*in das relevante Wissen über Bewegungsabläufe, Hilfsmittel und den Arbeitsplatz zur Verfügung stehen. Im zweiten Schritt muss dem/der Mitarbeiter*in ein Verständnis dafür vermittelt werden, welche Auswirkungen sein Handeln aus ergonomischer Sicht für ihn/sie selbst hat. Im letzten Schritt muss dieses Verständnis in den Kontext der Arbeit gebracht und dauerhaft durch den/die Mitarbeiter*in umgesetzt werden [Bul94].

2.4.2.2 Verhältnisergonomie

Unter dem Begriff Verhältnisergonomie wird die Gestaltung der Arbeitsumgebung für die Mitarbeiter*innen verstanden. Sie stellt die Ergonomie auf organisatorischer Ebene dar. Während der/die Mitarbeiter*in im Rahmen der Verhaltensergonomie selbst für eine ergonomische Ausführung der Tätigkeiten verantwortlich ist, kann er auf die Verhaltensergonomie nicht direkt einwirken. Dies ist vor allem die Aufgabe der betrieblichen Arbeitsplatzgestaltung. Sie schafft die Rahmenbedingungen, um dem/der Mitarbeiter*in die ergonomische Ausführung seiner Tätigkeit zu ermöglichen. Dazu gehören nicht nur Ausstattungsmerkmale des Arbeitsplatzes wie Manipulatoren für das Heben schwerer Gegenstände oder die Verwendung höhenverstellbarer Tische, sondern auch Aspekte wie Licht, Klima oder Umgebungsgeräusche am Arbeitsplatz [Eff01].

Besonders in manuellen Montagen gestaltet sich die ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze auf beiden Ebenen mit den dazugehörigen Aspekten als sehr umfangreich. Auch die Kosten, die häufig mit den notwendigen Anpassungen einhergehen, sind gerade für KMU oft schwierig zu bewältigen.

3 Darstellung der erzielten Projektergebnisse

In diesem Kapitel werden die im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse ausführlich dargestellt und beschrieben. Abschließendes Ergebnis des Forschungsprojektes ist ein Kamerasystem, welches am Montagearbeitsplatz aufgebaut mithilfe eines eigens dafür entwickelten Softwaredemonstrators Bewegungen der Mitarbeiter*innen erkennt und auf Basis ergonomiebezogener Gesichtspunkte bewertet. Auf Grundlage der Bewertung werden durch das System außerdem Handlungsmaßnahmen sowohl für den/die Mitarbeiter*in selbst als auch für die mit der Arbeitsplatzgestaltung betrauten Person gegeben. Das System gibt also Auskunft über die Güte der Bewegungsausführung und leistet Hilfestellung bei der Korrektur. Der zentrale Nutzen für KMU besteht in der kostengünstigen Beschaffung sowie der einfachen Anwendung des Systems.

Für die Entwicklung des Systems wurden diverse Teilziele abgeleitet und umgesetzt. So wurde über eine Erhebung der Anforderungen ein geeignetes Bewertungssystem mit Handlungsmaßnahmen entwickelt, welches anschließend in einen Softwaredemonstrator implementiert wurde. Dieser wurde dann mit dem Kamerasystem verknüpft, um zum Abschluss in einen EBS-Demonstrator überführt und sowohl unter Laborbedingungen als auch in einer realen Produktionsumgebung validiert zu werden.

Zur Erreichung des Forschungsziels diente ein Arbeitsplan mit fünf Arbeitspaketen, die dem Antrag entsprechend wie folgt beschrieben sind:

AP 1: Planung des echtzeitfähigen, kamerabasierten EBS

- 1.1 Identifikation der inhaltlichen Anforderungen
- 1.2 Identifikation der technischen Anforderungen
- 1.3 Erstellung des Lastenheftes
- 1.4 Ableitung von Kriterien für die Validierung

AP 2: Konzeption und Detaillierung des EBS

- 2.1 Erstellung des Technologiekonzepts
- 2.2 Erstellung des Bewertungskonzepts
- 2.3 Erstellung des Konzepts für die Ableitung von Potentialen und Handlungsmaßnahmen
- 2.4 Erstellung des Konzepts für den Demonstratoraufbau

AP 3: Technische Umsetzung des echtzeitfähigen, kamerabasierten EBS

- 3.1 Programmierung der Algorithmen

3.2 Aufbau des Demonstrators

AP 4: Validierung und Optimierung des Demonstrators unter Realbedingungen

4.1 Validierung des EBS unter Testbedingungen

4.2 Validierung des EBS unter Realbedingungen

4.3 Erstellung und Validierung des Anwendungsleitfadens

AP 5: Projektkoordination und Transfer der Projektergebnisse

Nachfolgend werden die Arbeitspakete im Einzelnen mit der verwendeten Vorgehensweise und den im Arbeitspaket erzielten Ergebnissen vorgestellt. Dazu wird zunächst das Ziel des Arbeitspakets erläutert und die zur Zielerreichung durchgeführten Schritte dargelegt. Abschließend werden die Ergebnisse detailliert aufbereitet.

3.1 Arbeitspaket 1: Planung des echtzeitfähigen, kamerabasierten EBS

Arbeitspaket 1 zielt auf die Ermittlung der funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen für das echtzeitfähige, kamerabasierte EBS ab. Hierbei werden zwei Teilziele verfolgt. Das erste Teilziel besteht in der Identifikation der inhaltlichen (Arbeitspaket 1.1) und technischen Anforderungen (Arbeitspaket 1.2) sowie deren Dokumentation in Form eines Lastenheftes (Arbeitspaket 1.3). Das zweite Teilziel beinhaltet die Ableitung der Kriterien, anhand derer die Validität des entwickelten EBS überprüft wird (Arbeitspaket 1.4).

Vorgehen:

Für die Ermittlung der Anforderungen wurde ein Vorgehen gewählt, bei welchem zunächst allgemein alle Anforderungen an das zu entwickelnde System gesammelt und diese dann in eine Anforderungsliste eingeordnet wurden. Im nächsten Schritt wurden die Anforderungen auf etwaige Zielkonflikte, wie z. B. maximale Transportfähigkeit und lange Einsatzdauer bei Energieautarkie überprüft und anschließend priorisiert. Im letzten Schritt wurden die Anforderungen in einem Lastenheft (Anhang) zusammengefügt.

Die Anforderungen können sowohl funktionaler als auch nichtfunktionaler Art sein. Funktionale Anforderungen beziehen sich auf gewünschte Funktionalitäten des EBS, nichtfunktionale Anforderungen charakterisieren die angestrebte Qualität, in welcher die geforderte Funktionalität bereitgestellt werden soll. Zudem wurden die Anforderungen in inhaltliche und technische Anforderungen gegliedert. Ermittelte Anforderungen wurden dann in einem Lastenheft festgehalten, um diese später den erzielten Ergebnissen gegenüberzustellen.

Die Sammlung der Anforderungen erfolgte im Rahmen eines Workshops mit den im Projekt beteiligten Unternehmen. Dadurch sollte gewährleistet werden, dass die Anforderungen an das System jenen der designierten Anwender gleichkommen. Da es sich bei dem zu entwickelnden *WorkCam*-Demonstrator um eine Lösung handelt, welche vornehmlich KMU bei der Bewertung von Ergonomie am Montagearbeitsplatz unterstützen soll, waren die Kosten des Systems sowie dessen aufwandsarmer Einsatz wichtige Aspekte.

Ergebnisse:

Das als Ergebnis des Arbeitspaket 1 entstandene Lastenheft orientiert sich an folgender Gliederung:

1. Konzept und Rahmenbedingungen
2. Beschreibung der inhaltlichen Anforderungen
3. Beschreibung der technischen Anforderungen
4. Validierung des Systems

Unter *1. Konzept und Rahmenbedingungen* wurden im Lastenheft die über- und untergeordneten Ziele, die Zielgruppe sowie eine grobe Beschreibung der angestrebten Funktionsweise festgehalten. Die unter den Punkten zwei und drei beschriebenen inhaltlichen und technischen Anforderungen sind im Lastenheft weiter untergliedert in:

2. Inhaltliche Anforderungen
 - 2.1. Allgemeine Anforderungen
 - 2.2. Bewegungsaufnahme
 - 2.3. Bewegungserfassung
 - 2.4. Bewegungsbewertung
 - 2.5. Potentialidentifikation
 - 2.6. Auswahl von Handlungsfeldern
 - 2.7. Vorschlag von Handlungsmaßnahmen
3. Technische Anforderungen
 - 3.1. Anforderungen an die eingesetzten Kameras
 - 3.2. Konstruktive Forderungen
 - 3.3. Anforderungen an die Software
4. Ökonomische Anforderungen

Tabelle 2: Ausschnitt aus dem Lastenheft mit Anforderungen zur Bewegungsaufnahme und -erfassung

1.2 Bewegungsaufnahme und -erfassung	
Nr.	1.4
Priorität	1
Titel	Kamerabasierte Bewegungsaufnahme in Echtzeit
Beschreibung	Das System muss dem Anwender ermöglichen, die aufgenommenen Bewegungen live auf einem Bildschirm beobachten zu können
Nr.	1.5
Priorität	1
Titel	Speichern von Bewegungsabfolgen
Beschreibung	Das System soll die Bewegungsabfolgen eines Probanden speichern, damit ein späterer Vergleich unter allen Probanden durchgeführt werden kann

In Tabelle 2 sind exemplarisch zwei Anforderungen an das System zur Aufnahme und Erfassung von Bewegungen abgebildet. Neben einer fortlaufenden Nummerierung sowie einem Titel und einer dazugehörigen Beschreibung ist auch eine Priorität der Anforderungen angegeben. Für die Priorisierung wurden die Zahlen 1 bis 3 verwendet, wobei 1 die höchste und 3 die niedrigste Priorisierung aufzeigt. Neben dem Initialworkshop wurde auch im Rahmen von Unternehmensbesuchen und Gesprächen mit einzelnen Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses die Zuordnung der Prioritäten zu den einzelnen Anforderungen vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass die Einschätzungen von Unternehmen zu Unternehmen variieren können. Durch die Aufnahme neuer Unternehmen in den PA, auch während der Projektlaufzeit, wurde die Priorisierung im Rahmen der Möglichkeiten angepasst. Auch die Möglichkeiten zur Umsetzung wurden dabei durch das Projektteam berücksichtigt.

Darüber hinaus wurden im Lastenheft im Abschnitt 4. *Validierung des Systems* auch die Demonstratorumgebung, in welcher das zu entwickelnde EBS validiert werden soll, beschrieben und zusätzlich die Kriterien für die spätere Validierung des Systems festgehalten. Der Aufbau der Demonstratorumgebung wird in Arbeitspaket 2 unter 2.4 *Erstellung eines Konzepts für den Demonstratoraufbau* wieder aufgegriffen. Die Kriterien zur Validierung orientieren sich an der ISO 25010 für Qualitätsmerkmale von Software. Im Wesentlichen werden dort die folgenden Bereiche betrachtet:

- Funktionalität
- Zuverlässigkeit

- Benutzbarkeit
- Effizienz
- Wartbarkeit
- Sicherheit
- Kompatibilität
- Portabilität

Im Lastenheft sind diese Kriterien in weiteren Unterkriterien genau definiert, sodass eine Evaluation des zu entwickelnden Demonstrators in Arbeitspaket 4 möglich ist. Auf die Validierung wird in Kapitel 3.4 noch einmal detailliert eingegangen.

3.2 Arbeitspaket 2: Konzeption und Detaillierung des EBS

Nach der Anforderungsdefinition wurde in Arbeitspaket 2 das Konzept für das EBS entwickelt. Hierzu erfolgte zunächst die Konzeption der Technologie hinsichtlich des Skelettmodells, welches dem EBS zugrunde liegt (AP 2.1). Darüber hinaus erfolgte die Entwicklung eines Bewertungskonzepts, auf das bei der Ergonomiebewertung zurückgegriffen wird (AP 2.2). Darauf aufbauend wurde die Ableitung der Potentiale und Handlungsmaßnahmen konzipiert (AP 2.3). Abschließend erfolgte die Konzepterstellung für den Demonstratoraufbau (AP 2.4).

Vorgehen:

AP 2.1 Erstellung des Technologiekonzepts

Zur ersten Evaluation verfügbarer Technologien am Markt wurde ein Demonstrator mit begrenztem Funktionsumfang mit einer Kinect Kamera Version 2.0 und dem zugehörigen Microsoft Software Development Kit (SDK) entwickelt. Parallel dazu wurden wegen der niedrigauflösenden Skelettierungsmethode im Bereich des Rückens verschiedene andere Optionen evaluiert. Hierbei wurde zunächst, wie im Antrag beschrieben, die Middleware NiTE2 in Verbindung mit dem Open Natural Interaction Framework (OpenNI) untersucht. Negativ ist die restriktive Verfügbarkeit des Softwarepakets zu vermerken, da das Entwicklerunternehmen Primesense von Apple übernommen wurde und offiziell nicht weiter verfügbar ist. Des Weiteren ist die Lizenzlage der nur auf Umwegen, d. h. inoffiziellen Quellen erhältlichen Softwarelage ungeklärt. Durchgeführte Tests zeigten vor allem eine sehr viel unzuverlässigere Skelettierung als mit dem Kinect SDK. So wurde z. B. eine deutlich längere Zeitspanne bis zu einer ersten Detektion einer Person bemerkt. Des Weiteren wurden durch die eingesetzte NiTE2 Software oftmals Arbeitshilfsmittel, wie z. B. ein aufgehängter Drehmomentschrauber, als Mensch erkannt und skelettiiert. Die angeführten Unzuverlässigkeiten führten zum Ausschluss der Software aus den möglichen Lösungen. Außerdem wurde das PointCloudLibrary-Framework in Verbindung mit

einer 3D-Kamera der Marke ZED getestet. Hierbei musste jedoch festgestellt werden, dass durch die Kamera eine theoretische Aufnahme von 60 Doppelbildern pro Sekunde ermöglicht werden, trotz Datenverarbeitung auf dem Grafikprozessor daraus jedoch lediglich 9 Punktwolkendatensätze pro Sekunde resultierten, welche mittels PointCloudLibrary ausgegeben wurden. Da diese Frequenz unterhalb der Echtzeitfähigkeit, d. h. der Merkschwelle des Menschen liegt, wurde diese Lösung ebenfalls ausgeschlossen. Als weitere, mögliche Lösung wurde die Software OpenPose evaluiert. Dessen Skelettierung erfolgt nur zweidimensional, jedoch mit einer sehr guten Positionsauflösung. Mit im Schnitt 20 Bildern pro Sekunde wurde diese Methode als grenzwertig bzgl. der Rechenzeit angesehen. In Verbindung mit einer Intel Realsense D415 Kamera wurde das zweidimensionale Bild der 3D-Kamera mit der o. g. Methode prozessiert und die parallel erfasste dritte Komponente der Kamera als Tiefeninformation den detektierten Skelettpunkten hinzugefügt. Dabei wurde jedoch festgestellt, dass durch die verwendete Kamera eine schnell alternierende Tiefenkomponente erzeugt wurde, welche eine Verwendung der Skelettierungsmethode im dreidimensionalen Raum verhinderte. Ein weiteres Kriterium gegen OpenPose sind die hohen Lizenzkosten von 25.000 US\$, welche eine Einführung der entwickelten Lösung bei KMU entgegenstehen. Auf Grundlage dieser Tatsache wurde beschlossen, zunächst eine eigene, auf dem Stand der Forschung basierende Skelettierungsmethode, zu implementieren.

AP 2.2 Erstellung des Bewertungskonzepts

Um eine für die kamerabasierte Ergonomiebewertung sinnvolle Bewertungsmethodik zu entwickeln, mussten nicht nur die Anforderungen aus dem in Arbeitspaket 1 erstellten Lastenheft, sondern auch einige Restriktionen einer kamerabasierten Bewertung berücksichtigt werden. Da die Bewertung von Arbeitsplatzergonomie schon für den Menschen, je nach Bewertungsmethode und Genauigkeit der Betrachtung, einen komplexen Vorgang darstellt, ist die Umsetzung in einer Software nicht trivial. Der Mensch hat die Fähigkeit, Methodiken auf veränderte Rahmenbedingungen zu applizieren und auch mit unvorhergesehenen Ereignissen oder Einflüssen umzugehen. Dies kann genutzt werden und darauf aufbauende Ermessensentscheidungen getroffen werden. Dieses Verhalten kann ein System selbst mit starker Künstlicher Intelligenz aktuell nicht reproduzieren.

Um eine geeignete Bewertungsmethodik für die kamerabasierte Ergonomiebewertung bereitzustellen, wurden verschiedene Methoden aus der Literatur betrachtet (Tabelle 1) und auf ihre Eignung in Bezug auf die Anforderungen und Restriktionen hin bewertet. Die Verfahren wurden zunächst ihrer Detailtiefe nach in Grob-Screening-Verfahren, Screening-Verfahren und Detailverfahren eingeteilt. Dies korreliert auch mit dem zur analogen Bewertung notwendigen Zeitaufwand und gibt Aufschluss über die Menge der betrachteten Belastungsarten. Während

Grob-Screening-Verfahren nur dazu dienen, auf potentielle Risiken hinzuweisen, werden bei Detailverfahren unterschiedliche Belastungsarten gemessen, um eine ganzheitliche Bewertung zu ermöglichen. Abbildung 2 zeigt eine qualitative Einordnung der unterschiedlichen Verfahrenstypen nach den Charakteristika Detaillierungsgrad und Zeitaufwand, Kosten, Kapazität, Einsatzvielfalt, Allgemeingültigkeit und Genauigkeit. Der Detaillierungsgrad beschreibt in diesem Zusammenhang die Menge der im Rahmen einer Ergonomiebewertung zu beachtenden Kriterien. Der Zeitaufwand für die Aufnahme der Daten korreliert mit dem Detaillierungsgrad. Die Kosten steigen ebenfalls mit dem Detaillierungsgrad. Das kann zum einen mit dem höheren Zeitaufwand begründet werden, zum anderen müssen bei der Durchführung von Experten- oder Messverfahren unter Umständen Kapazitäten oder Geräte beschafft werden. Je detaillierter das Verfahren ist, desto geringer wird auch die Einsatzvielfalt, da einfacher aufgebaute Verfahren leichter veränderbar sind als detailreich konzipierte Messverfahren. Dementsprechend lässt sich für die detaillierteren Verfahren auch eine geringere Allgemeingültigkeit ausweisen, wohingegen sie jedoch eine höhere Genauigkeit bei der Ermittlung der Belastung haben [Win94].

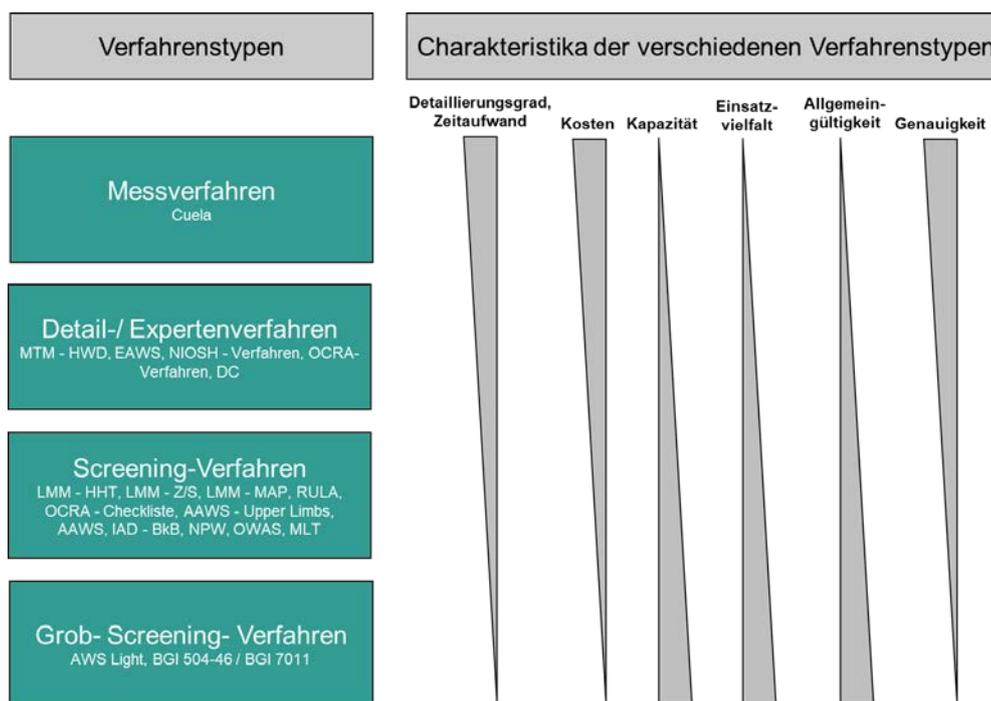


Abbildung 2: Einteilung der Ergonomiebewertungsverfahren in Anlehnung an WINKEL UND MATHIASSEN [Win94]

Die im Lastenheft geforderte Detailtiefe der Bewertung gab für das zu entwickelnde Verfahren eine Positionierung zwischen den Screening-Verfahren und Detailverfahren vor. Unter Beachtung der oben beschriebenen Restriktionen einer kamerabasierten Ergonomiebewertung wurde für das zu entwickelnde *WorkCam-EBS* eine Detailtiefe, die in etwa der eines Grob-Screening-Verfahrens entspricht, anvisiert. Um eine fundierte Auswahl zu treffen wurden die

Bewertungsverfahren nach den Kriterien des Lastenheftes und den beschriebenen Restriktionen bewertet. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt der Bewertungsmatrix, in der die Verfahren anhand der Kriterien bewertet wurden.

Bezeichnung		Rumpf- und Körperhaltungen Allgemein	Bewegungen des Kopfes	Bewegungen der Arme	Bewegungen der Beine	Bewegungen des Finger-Hand-Systems	
		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Verfahrenstyp	Verfahren	Körperhaltungen/-bewegung					
Screening - Verfahren	LMM - HHT	1	0	1	1	0	
	LMM - Z / S	1	0	1	1	0	
	LMM - MAP	1	0	1	0	1	
	RULA	1	1	1	1	1	
	OCRA-Checkliste	0	0	1	0	1	
	AAWS - Upper Limbs	1	N.N.	N.N.	0	0	
	AAWS	1	0	1	0	0	1
	IAD - BkB	1	0	1	0	1	1
	NPW	1	0	1	0	0	1
	OWAS	1	0	1	1	0	0
	MLT	1	0	0	0	0	1
	PLIBEL	1	1	1	1	1	1
	PERA	1	1	1	1	1	1
	LUBA	1	1	1	0	1	0
PATH	1	1	1	1	0	1	
Detail- verfahren	MTM-HWD	1	1	1	1	1	1
	EAWS	1	0	1	0	1	1
	NIOSH-Verfahren	0	0	0	0	0	1
	OCRA-Verfahren	1	1	1	0	1	0
	DC	1	1	1	0	0	0
Grob-Screening Verfahren	AWS light	1	0	1	1	0	0
Dialog - Verfahren	REBA	1	1	1	1	1	1

Abbildung 3: Ausschnitt der Bewertungsmatrix unterschiedlicher Bewertungsverfahren für die Eignung zur kamerabasierten Ergonomiebewertung

Insgesamt wurden dafür 14 Kriterien abgeleitet. Dazu gehören die Berücksichtigung aller Körperteile, manueller Lastenhandhabung, repetitiver Tätigkeiten, die Unterscheidung der Körperhälften, die Verwendung von Aktionskräften, eine Differenzierung nach Geschlechtern, Arbeitsdauer und Pausen, die Beschreibung durch Piktogramme, Vernachlässigbarkeit von Kräften für die Bewertung sowie die Zugänglichkeit der Dokumente. In der Tabelle wurden die Kriterien dann mit „1“ (trifft zu) oder „0“ (trifft nicht zu) unterschieden. Zudem wurden die Kriterien unterschiedlich gewichtet, da sich einige Kriterien als entscheidender als andere erwiesen. So ist beispielsweise die Betrachtung aller Körperteile entscheidender als die Unterscheidung, ob es sich um die linke oder die rechte Körperhälfte handelt.

Als Verfahren mit der größten Übereinstimmung der notwendigen Charakteristika ließen sich Leitmerkmalmethode - Manuelle Arbeitsprozesse“ (LMM-MAP), Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Rapid Entire Body Assessment (REBA) und der Plan für Identifizierung av Belastungsfaktorer (PLIBEL) sowie das Detailverfahren Methods Time Measurement - Human Work Design (MTM-HWD) identifizieren. Aus Bestandteilen dieser Verfahren wurde dann eine eigene Bewertungsmethodik entwickelt, die sowohl die Anforderungen des Lastenheftes, als auch die der verfügbaren Technik berücksichtigt.

Da der Fokus bei der kamerabasierten Ergonomiebewertung auf den Haltungen der Körperteile während des Arbeitsprozesses liegt, wurden im nächsten Schritt die Grenzwerte für Körperhaltungen der einzelnen Verfahren betrachtet. Um auch gesetzlichen Vorgaben Rechnung zu tragen, wurden in die Betrachtung außerdem die Normen ISO 11226 und DIN EN 1005-4 aufgenommen. Die Gegenüberstellung der Grenzwerte erfolgte für jedes betrachtete Körperteil und ist in Abbildung 4 beispielhaft für die Flexion des Rückens dargestellt.

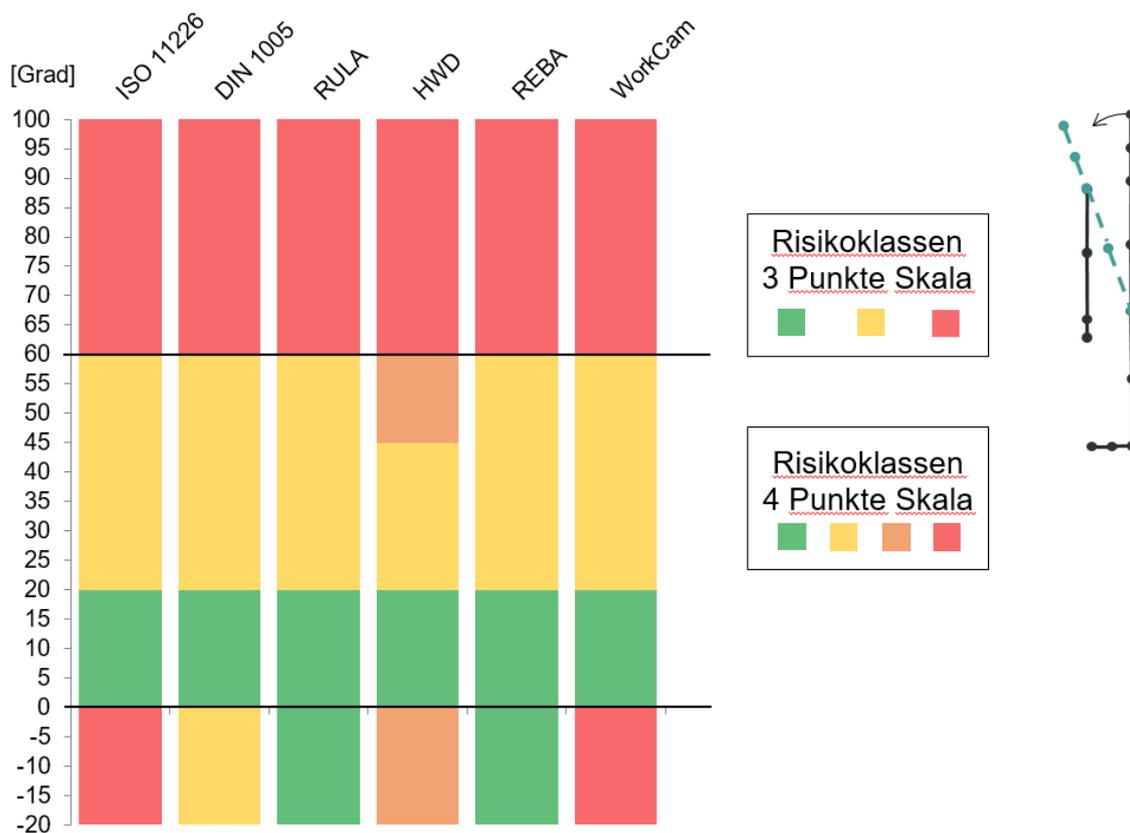


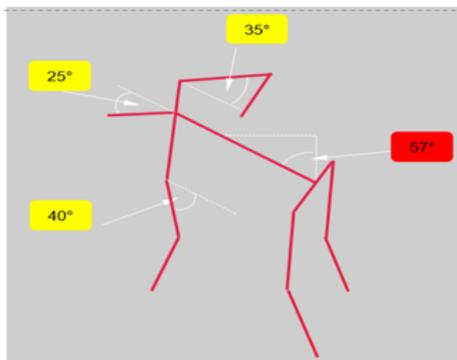
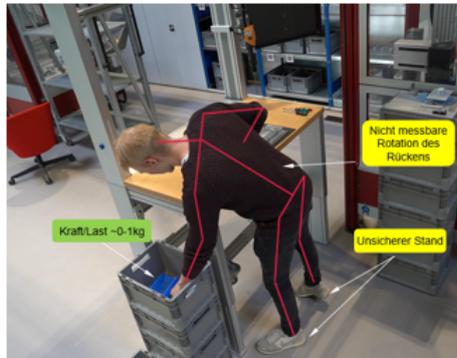
Abbildung 4: Schaubild zur Gegenüberstellung winkelbezogener Grenzen der Flexion des Rückens und die Einordnung in Risikoklassen in Bezug auf die Normen ISO 11226, DIN EN 1005-4 und die Ergonomiebewertungsmethoden RULA, MTM-HWD, ERIN und WorkCam

Die unterschiedlichen Farben stellen die Risikoklassen nach dem Ampelschema dar. Auf der Ordinate sind Gradzahlen aufgetragen, die den möglichen Bewegungsbereich für eine Flexion des menschlichen Rückens darstellen. Auf der Abszisse sind die zu vergleichenden Verfahren

dargestellt. Die Übergänge zwischen den Farben stellen die im jeweiligen Verfahren angegebene Grenze zu einer anderen Risikoklasse dar. So stellt nach der ISO 11226 eine Flexion des Rückens zwischen 0° und 20° den empfohlenen Bereich dar, während der Bereich zwischen 20° und 60° bereits auf mögliche Risiken hinweist. Der rote Bereich, der ab einer Flexion von 60° erreicht wird, sollte unter allen Umständen vermieden werden, da dieser eindeutig als schädigend bezeichnet wird und bei häufigem Auftreten mit negativen gesundheitlichen Folgen verbunden ist. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich wird, verwenden die meisten Methoden ein dreiteiliges Risikocluster für die einzelnen Körperteile. Einzig das MTM-HWD Verfahren verwendet in der betrachteten Auswahl vier Risikoklassen, in Abbildung 4 gekennzeichnet durch die orange eingefärbten Bereiche. Ganz rechts auf der Abszisse sind zum Vergleich die zunächst abgeleiteten Grenzwerte für das *WorkCam-EBS* dargestellt. Die Gegenüberstellungen der Grenzwerte zu den weiteren betrachteten Körperteilen sind ebenfalls in die Konzeption des *WorkCam-EBS* eingeflossen. Für die Festlegung der Grenzwerte im *WorkCam-EBS* wurde sich daran orientiert, welche Grenzwerte die Normen vorgeben, um diese in keinem Fall zu überschreiten. Im zweiten Schritt wurde anhand experimenteller Studien mit der zu verwendenden Kamera eine sinnvolle und umsetzbare Unterteilung vorgenommen und die ursprünglich abgeleiteten Werte teilweise angepasst. Da die Kamera bei durchgeführten Bewegungen nicht beliebig genau aufnehmen kann, in welcher Position sich ein Körperteil befindet, mussten zunächst Bereiche ermittelt werden, die sich klar voneinander unterscheiden lassen. So ist zum Beispiel in fast allen Verfahren zur Ergonomiebewertung eine Rotation des Kopfes mit einem erhöhten Risiko verbunden. Die Kamera kann die Bewegungen jedoch nicht beliebig genau detektieren. Da Rotationen nicht mit einer räumlichen Verschiebung der durch die Kamera dargestellten Gelenkpunkte einhergehen, sind diese kaum zu erfassen. Eine Unterteilung der Rotation des Kopfes in mehrere Risikoklassen wäre dementsprechend nicht sinnvoll gewesen.

Um die Funktionalität des *WorkCam-EBS* zu gewährleisten und die Konformität mit etablierten Bewertungsmethoden festzustellen, wurde das *WorkCam-EBS* vor der Einbindung in die Software validiert. Im ersten Schritt wurde ein Montagevorgang in der IFA-Lernfabrik durchgeführt und aufgezeichnet. Der Montagevorgang wurde anschließend durch zwei mit der Methodik der Ergonomiebewertung vertrauten Mitarbeiter unabhängig voneinander mit Hilfe des RULA-Verfahrens bewertet. Im Anschluss wurde der Vorgang mithilfe des *WorkCam-EBS* bewertet. Die Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen jeweils das Ergebnis der Bewertung mit dem RULA-Verfahren und dem *WorkCam-EBS* für eine beispielhafte Körperhaltung. Da das Ergebnis der beiden Analysen unabhängig von der bewertenden Person und dem verwendeten Bewertungssystem nahezu deckungsgleich waren, konnte davon ausgegangen werden, dass die Einbindung des *WorkCam-EBS* auch unter Verwendung einer Kamera zur Aufnahme der

Bewegungen zu validen Ergebnissen führt. Es wurden außerdem beispielhafte Handlungsmaßnahmen aus dem Maßnahmenkatalog (siehe AP 2.3) abgeleitet, um zu überprüfen, ob diese sinnvoll für die aus der Bewertung hervorgehenden Mängel am Arbeitsplatz sind.



	Punktzahl Li / Re		Punktzahl Li / Re
Oberarmwert	2 / 3	<u>Halswert</u>	3
Unterarmwert	1 / 2	Oberkörperwert	5
Handgelenkswert	1 / 1	<u>Beinwert</u>	2
Umwendungswert	1 / 1		
Haltungswert für Arm & Handgelenk	2 / 3	Haltungswert für Hals, Oberkörper & Beine	7
Wert für Muskularbeit	1 / 0	Wert für Muskularbeit	1
Wert für Kraft / Last	0 / 0	Wert für Kraft / Last	0
Gesamtwert (A) für Arm & Handgelenk	3 / 3	Gesamtwert (B) für Hals, Oberkörper & Beine	8
Gesamtpunktzahl			6 / 6

Abbildung 5: Ergebnis der Bewertung des Montagevorgangs mit dem RULA-Verfahren

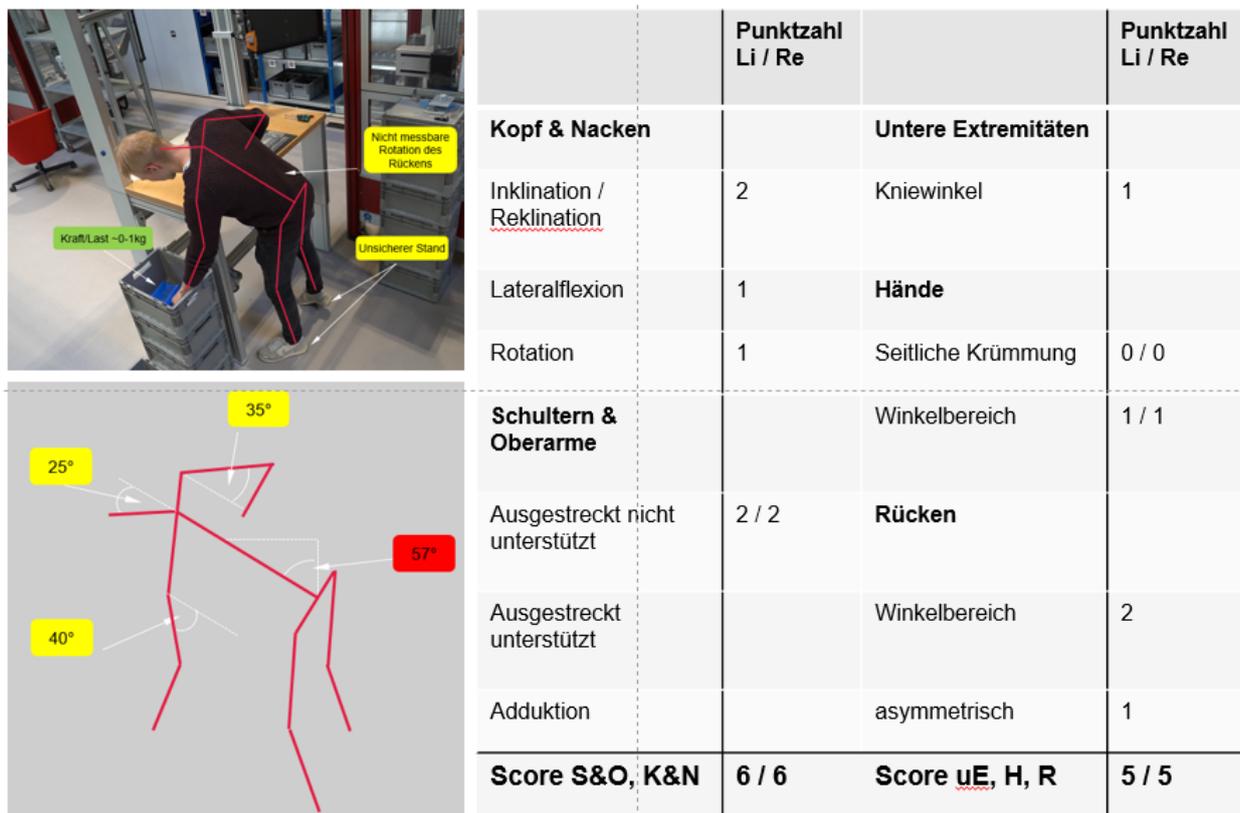


Abbildung 6: Ergebnis der Bewertung des Montagevorgangs mit dem WorkCam-EBS

AP 2.3 Erstellung des Konzepts für die Ableitung von Potentialen und Handlungsmaßnahmen

Um den Aspekt der Bewertung der Ergonomie am Arbeitsplatz sinnvoll zu erweitern, war das Ziel von AP 2.3, die Bewertung mit konkreten Handlungsmaßnahmen für die Gestaltung des Arbeitsplatzes und die Ausführung der Tätigkeit durch den/die Mitarbeiter*in zu verknüpfen und in das Gesamtsystem einzubinden. Für die Zusammenstellung der Handlungsmaßnahmen wurden unterschiedliche Ansätze der Gestaltung entsprechender Maßnahmen aus der Literatur analysiert sowie Expertengespräche mit Vertretern der im projektbegleitenden Ausschuss mitwirkenden Unternehmen geführt. Bei der Auswahl der Maßnahmen wurde insbesondere auf die Relevanz und Anwendbarkeit für die manuelle Montage geachtet. Anschließend wurden die Maßnahmen kategorisiert und beschrieben. Um den Unternehmen die Anwendung zu erleichtern erfolgte die Beschreibung in Form von Steckbriefen für die einzelnen Maßnahmen. Ein Beispiel für einen solchen Steckbrief ist in der Zusammenfassung der Ergebnisse dieses Arbeitspakets abgebildet.

AP 2.4 Erstellung des Konzepts für den Demonstratoraufbau

Neben der Entwicklung des softwaretechnischen Konzepts und der Bewertungsmetrik wurde in Arbeitspaket 2 ein konstruktives Konzept für den *WorkCam*-Demonstrator methodisch entwickelt. Dabei kam die Methode der Nutzwertanalyse zum Einsatz. Hierfür wurden zunächst, abgeleitet von den allgemeinen Anforderungen, konkrete Einsatzszenarien evaluiert und eine Bewertung für die zu entwickelnden Konzepte erstellt. In einem nächsten Schritt wurden verschiedene Konzepte konstruiert und anhand unterschiedlicher Kriterien beispielsweise aus dem Lastenheft bewertet. Das gewinnende, ausgewählte Design wurde im nächsten Schritt weiter detailliert.

Ergebnisse

AP 2.1 Erstellung des Technologiekonzepts

Durch die Evaluation verschiedener Softwarepakete wurde zunächst ein Funktionsdemonstrator mit der Kinect Kamera Version 2.0 entwickelt und getestet. In einem nächsten Schritt wurden verschiedene Kameratechnologien und verfügbare Software zur Skelettierung von Bilddaten evaluiert. Es wurde entschieden, zunächst eine eigene Skelettierung umzusetzen. Ein Technologiekonzept auf Basis von Deep-Learning wurde entwickelt. Insbesondere wurde für diese datengetriebene Methode ein Konzept zur Generierung synthetischer Posendaten erarbeitet.

AP 2.2 Erstellung des Bewertungskonzepts

Aus den gesammelten Informationen wurde ein Bewertungskonzept für die einzelnen Körperteile erstellt. Diese lassen sich in die vier Bereiche *Kopf und Nacken*, *Schultern und Oberarme*, *Rücken* und *untere Extremitäten* aufteilen. Für *Hände* und *Unterarme* wurde zwar ein Konzept erstellt, die Bewertung für diese Körperteile ist jedoch durch die Auflösung der Kamera nicht abbildbar, weshalb es im EBS-Demonstrator keine Verwendung findet. Für die Bewertung der einzelnen Haltungen nach dem Vorbild bestehender Bewertungssysteme wurde ein Konzept aufgebaut, welches in einer separaten Datei zur Verfügung steht. Entsprechend der von der Kamera erfassten Körperhaltung wird diese in die Kategorien *geringes Risiko*, *mittleres Risiko* und *hohes Risiko* eingeteilt. Zudem berücksichtigt das Konzept die Häufigkeit sowie die Dauer der erfassten Haltung und bezieht diese in die Bewertung ein. Die Software der *WorkCam* kann bei der Bewertung von Körperhaltungen durch die Kamera auf die Informationen zugreifen und auf Basis dessen eine Einschätzung über die Güte der Haltung der Person abgeben. Das gesamte Bewertungskonzept sowie die Bewertungsmatrix sind aufgrund ihrer Größe innerhalb des Berichts nicht abbildbar.

AP 2.3 Erstellung des Konzepts für die Ableitung von Potentialen und Handlungsmaßnahmen

Nach intensiver Literaturrecherche und ergänzenden Gesprächen mit Vertretern der Unternehmen des PA wurde ein Katalog mit insgesamt 90 Maßnahmen erstellt. Abbildung 7 zeigt einen Steckbrief aus dem Maßnahmenkatalog.

Maßnahmenkatalog

Hauptinformationen				
Handlungsempfehlung	Wirkraum der Hände soll den Bewegungsbahnen und Bewegungsmöglichkeiten der Körperglieder folgen			
Problem				
Handlungsfeld	Hände			
Belastungsart	Statisches Halten	Frequenz		
	✓	✓		
Problemstellung	Häufige (Greif-)Bewegungen der Arme unter Verwendung des gesamten Oberkörpers			
Maßnahmeneinschätzung				
Bereich	Nachhaltigkeit	Umsetzungsdauer	Kosten	Auswirkung auf Arbeitsergonomie
Einschätzung	●	●	○	●
Wirkrichtung Gestaltungsfeld				
Gestaltungsfeld	Verhältnisergonomie		Verhaltensergonomie	
	Arbeitsgestaltung- und Organisation	Arbeitsplatz und Ausrüstung		
Relevanz	✓	✓	✗	

Legende:

- = Merkmal ist stark ausgeprägt
- = Merkmal ist durchschnittlich ausgeprägt
- = Merkmal ist schwach ausgeprägt

Abbildung 7: Steckbrief aus dem Maßnahmenkatalog zur Verbesserung der Ergonomie am Arbeitsplatz

Die Steckbriefe sind in vier Abschnitte eingeteilt. Unter *Hauptinformation* findet sich die entsprechende Handlungsempfehlung. Der Abschnitt *Problem* dient der Software der *WorkCam* zur Auswahl der richtigen Handlungsmaßnahme auf Basis der festgestellten Problemstellung. Im Wesentlichen wird nach zwei Kategorien ausgewählt, dem Handlungsfeld und der Belastungsart. Das Handlungsfeld bezieht sich auf die in *AP 2.2* erläuterten Bereiche des Körpers. Wird durch die *WorkCam* beispielsweise eine ergonomische Problemstellung im Bereich der Hände festgestellt, sucht die Software im Maßnahmenkatalog nach Maßnahmen, die unter dem Handlungsfeld *Hände* dort eingeordnet sind. Im nächsten Schritt wird gemäß des Bewertungskonzepts nach der Belastungsart (langes statisches Halten oder eine zu hohe Frequenz) unterschieden, um so die Maßnahmen entsprechend der Problemstellung zielgenau auswählen zu können. Abschließend dient eine ergänzende Problembeschreibung, die mit der tatsächlich aufgetretenen Problembeschreibung verglichen werden kann, dem Arbeitsplatzgestalter bei der genauen Einordnung der Maßnahme. Aufschluss über die erwartete Wirkung der Maßnahme soll das dritte Feld der *Maßnahmeneinschätzung* geben. Diese qualitativen Einschätzungen der Wirkung einzelner Maßnahmen sind nach intensiver Literaturrecherche und Gesprächen mit Vertretern der Unternehmen des PA entstanden. Sie sollen dem Arbeitsplatzgestalter als Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Verbesserung der Ergonomie am Arbeitsplatz dienen. Zuletzt ist auf dem Steckbrief noch die entsprechende Wirkrichtung der Maßnahme angegeben. Wie in Abschnitt 2.4.2 dargestellt, lässt sich die Wirkrichtung in die Bereiche Verhältnis- und Verhaltensergonomie einteilen. Auch diese Einschätzung wurde anhand von Literaturrecherche und Gesprächen mit dem projektbegleitenden Ausschuss getroffen.

AP 2.4 Erstellung des Konzepts für den Demonstratoraufbau

Wie oben bereits beschrieben, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt, dessen Ergebnis in Abbildung 8 zu sehen ist. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse beinhaltet das Konzept des

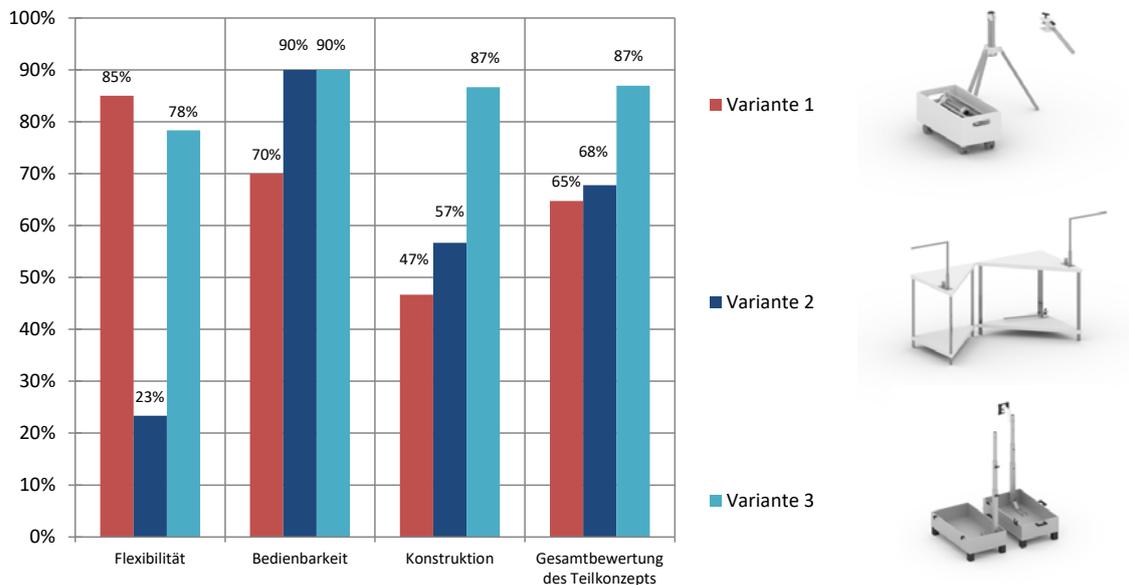


Abbildung 8: Nutzwertanalyse der konstruktiven Ausführung des Demonstrators

Demonstratoraufbaus.

Der Demonstratoraufbau soll dabei so gestaltet sein, dass alle Funktionen in eine Kiste zu integrieren sind. Die Kamera soll an einer Teleskopstange, die in der Kiste verstaubar ist, befestigt werden. Zusätzlich ist eine einklappbare Vorrichtung zum sicheren Aufstellen eines Laptops vorgesehen.

3.3 Arbeitspaket 3: Technische Umsetzung des echtzeitfähigen, kamerabasierten EBS

Ziel von AP 3 ist die technische Umsetzung eines echtzeitfähigen, markerlosen Trackingsystems, welches neben der Erfassung von Bewegungen der betrachteten Mitarbeiter*innen die simultane Bewertung der Bewegungen sowie eine Inferenz möglicher Abstellmaßnahmen umfasst. Das o. g. Gesamtziel wurde im Rahmen der Projektbearbeitung in drei Teilziele unterteilt: Die Skelettierung des/der betrachteten Mitarbeiters*in, die ergonomische Analyse und die Maßnahmenableitung. Die Teilziele sind dabei aufeinander aufbauend gestaltet.

Vorgehen

AP 3.1 Automatisierte Skelettierung des Mitarbeiters*in auf Basis von Kameradaten

Im Rahmen des Forschungsantrags wurden als Methoden zur Skelettierung von Personen in Echtzeit sogenannte „HaarCascade“-Detektoren und „HSV color filtering“ angeführt. Diese Methoden sind Verfahren, die in einfachen Einsatzszenarien Anwendung finden. „HSV color filtering“, d. h. die Benutzung von Farbfiltern im Hue-Saturation-Value-Farbraum ist ungeeignet

für das im Vorhaben proklamierte Ziel. HSV-Farbfilterung als Methode zur Skelettierung von Mitarbeitern*innen erfordert, dass Körperteile von Mitarbeitern*innen farblich bspw. durch Marker (z. B. durch Anziehen eines Body-Suits, vgl. Abschnitt Stand der Technik) hervorgehoben werden. Mit dem Forschungsziel, ein markerloses optisches Tracking durchzuführen, stellt die angeführte Methode durch dessen technischer Natur somit einen Zielkonflikt dar.

„HaarCascade“-Detektoren stellen eine einfache datengetriebene Methode dar, um wiederholende Muster, z.B. Menschen oder deren Gesichter, in Bildaufnahmen zu detektieren. Zur Anwendung der Methode muss entweder ein großer Datensatz oder ein fertiges Modell, welches die Erkennung und Segmentierung von Menschen erlaubt, verfügbar sein. „HaarCascade“-Detektoren können bspw. im Einsatzbereich der Personendetektion, z.B. für eine Zählung von Menschen in einem Bild, eingesetzt werden. Im deutlich komplexeren Einsatzbereich der Posenextraktion bzw. Bewegungsrekonstruktion sind vornehmlich CNN basierte Methoden im Einsatz.

Aktuelle wissenschaftliche Ansätze der Posenextraktion sind zumeist datengetrieben. Durch einen großen (z. B. Human 3.6M - 3,6 Millionen Datensätze zu humaner Bewegung [Ion14]) annotierten Datensatz von Bildern mit Menschen wird mittels Methoden der Künstlichen Intelligenz ein Modell trainiert, welches in der Anwendung die Skelettierung der Person vornimmt, d. h. die Segmentierung der Eingabedaten in die für den Menschen typischen Knochen/Gelenke. Hierbei gibt es verschiedene existierende Modelle, welche z. T. kommerziell angeboten werden. Im Rahmen der Durchführung von Arbeitspaket 3 wurden verschiedene Methoden untersucht und festgestellt, dass zum einen die Auflösung der vorgegebenen Skelettierungen, also die Anzahl der getrackten Knochen besonders im Bereich Rücken/Nacken mit 0 Gelenken oder 1 Gelenk gering ist, zum anderen die Skelettierung sehr unruhig verläuft. Gliedmaßen schwingen in der Aufnahme stark (kurzzeitige, zufällige Winkelausschläge) obwohl sich die Testperson wenig bis gar nicht bewegt. Da beide Befunde in den bisher verfügbaren Methoden eine Ergonomieanalyse erschweren, wurde zunächst entschieden, ein eigenes Modell zur Skelettierung von Personen zu entwickeln. Die Herangehensweise der Entwicklung eines eigenen Modells umfasste zunächst das Herunterbrechen der übergeordneten Aufgabe der echtzeitfähigen Ergonomiebewertung in Unteraufgaben und ist in Abbildung 9 verdeutlicht: Zunächst muss aus den Kameradaten ein Bereich von Interesse erkannt und verfolgt werden, in dem die zu bewertende Person enthalten ist. Im Anschluss muss der Bereich des Interesses segmentiert werden, damit eine alleinige Erkennung der Bewegungen der Person ohne Hintergrundeinflüsse vorgenommen werden kann.

Die eigentliche, im Anschluss ablaufende Bewegungserkennung (Skelettierung) muss dann eine Rekonstruktion der Bewegung im Raum auf Grundlage der Kameradaten leisten.

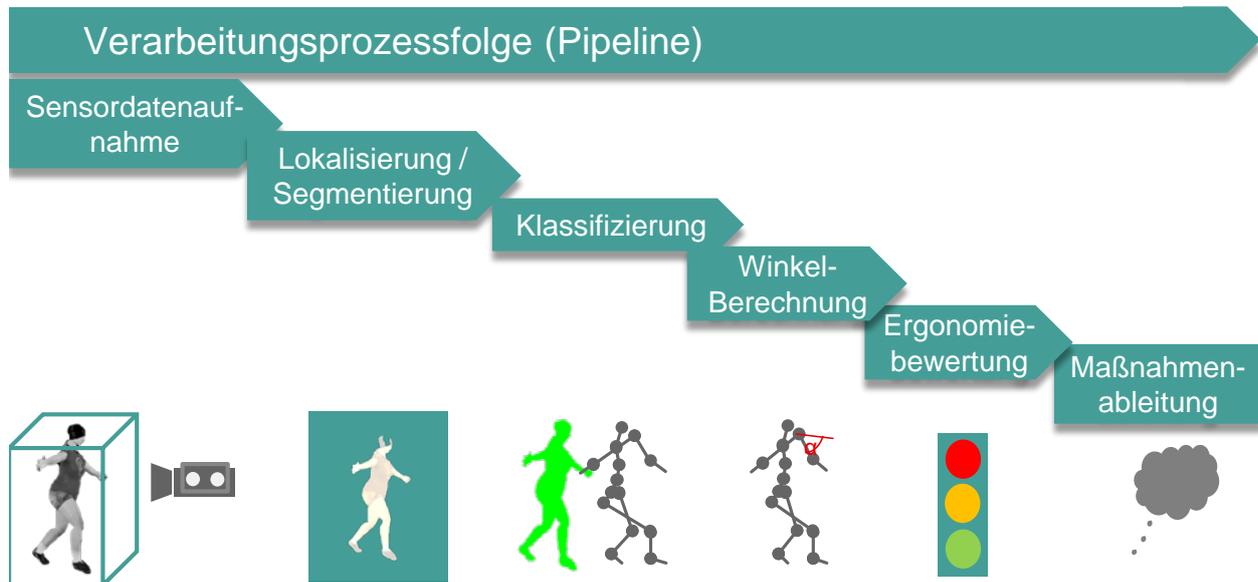


Abbildung 9: Verarbeitungsprozessfolge zur kamerabasierten Ergonomiebewertung und Maßnahmenableitung

Im Anschluss daran erfolgt die Berechnung der Winkel der detektierten Knochen zueinander. Die berechneten Winkel werden im nächsten Schritt mit der entwickelten Bewertungsmetrik im Hinblick auf die Ergonomie bewertet. Durch Differenzierung nach Häufigkeit und Körperteil können daraufhin mittels des Case Based Reasoning-Ansatzes Maßnahmen empfohlen werden.

Zur Entwicklung der o. g. Modelle musste zunächst eine umfassende Datenbasis mit hoher Variation an Bewegungsdaten, d. h. hohem Umfang individueller Bewegungen und verschiedener Personen, gesucht werden. Damit auch KMU eine ökonomisch vertretbare Nutzung des Demonstrators ermöglicht wird, wurden zunächst verfügbare Datensätze mit kompatiblen Lizenzmodellen recherchiert. Die recherchierten Datensätze sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Datensätze der Carnegie Mellon University (CMU) stellten sich als differenziert, umfassend, kommerziell verwertbar und in einem temporal hochauflösenden dreidimensionalen Format verfügbar heraus. Da das bereitgestellte dreidimensionale Format des o. g. Datensatzes selbst keine visuellen Informationen bereitstellt, wurde zur Datenerstellung, d. h. zur Anpassung von humanoiden, dreidimensionalen Oberflächengeometrien, auf die im Datensatz bereitgestellten Posendaten ein Skript für das OpenSource-Programm MakeHuman ([Bas08]) entwickelt. Mit dem entwickelten Skript wurde ermöglicht, automatisiert verschiedenste humane Phänotypen, Geschlechter und Altersstufen dreidimensional abzubilden.

Tabelle 3: Gegenüberstellung verfügbarer Datensätze. *): Nur für Forschungszwecke, keine kommerzielle Verwertung; 1) keine kommerzielle Redistribution desselben Datensatzes, ansonsten freie kommerzielle Verwertung zugelassen

Datensatz	Aktionen [n]	Personen [n]	Gelenke [n]	2D / 3D Pose	Lizenz
CMU – MMAC [CMU10]	2605	43	22	3D	copyleft ¹⁾
HumanEva I [Sig10]	6	4	15	3D	n.F.*)
Cornell Activity 120 [Kop12]	10	4	15	2D	n.F.*)
Berkeley MHAD [Of113]	660	12	21	3D	BSD-2
MPII Human Pose [And14]	17	11	32	2D	BSD / n.F.*)
Human 3.6M [Hin14]	15	17	24	3D	n.F.*)
NTU RGB+D [Sha16]	60	40	25	2D	n.F.*)
JTA [Fab18]	512	0-60	14	3D	n.F.*)

Die resultierenden humanoiden Oberflächengeometrien wurden automatisiert gespeichert. Durch ein weiteres entwickeltes Skript konnten die nicht normalisierten Posendaten normalisiert und die gespeicherten humanoiden Oberflächengeometrien auf die Posendaten uniform angepasst werden. Aus den vorliegenden Daten wurde zur automatisierten Erstellung der Datensatzdateien eine virtuelle Kameraumgebung erstellt und die humanoiden Oberflächengeometrien unter verschiedensten Lichteinflüssen mit jeder virtuellen Kamera gerendert. Die Kameraparameter sowie die Weltkoordinaten und Kamerakoordinaten wurden zusammen mit den gerenderten Bildern gespeichert. Die Modellbildung wurde mittels TensorFlow, einem DeepLearning-Framework, durchgeführt. Hierbei wurde ein DeepLearning-Modell, basierend auf verschiedenen, heute in der Bildverarbeitung gängigen Architekturen adaptiert. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Im oberen Bildabschnitt ist das Training gegenüber der Modellevaluation dargestellt. Auf der Abszisse sind hierbei die untersuchten Modelltypen aufgetragen und auf der Ordinate die erreichten Genauigkeiten. Es ist zu erkennen, dass ein geringer Fehler in Training und Evaluation erreicht werden konnte. Im unteren Bildabschnitt ist die Inferenzgeschwindigkeit der entwickelten Modelle dargestellt. Auf der Abszisse sind wiederum die verwendeten Modelltypen aufgetragen, auf der Ordinate die Evaluationszeit pro Bild. Es ist bei allen untersuchten Modelltypen eine Evaluationszeit von über 3 Sekunden pro Bild

erzielt worden, was nicht mit der Anforderung nach einer echtzeitfähigen Ergonomieanalyse vereinbar ist.

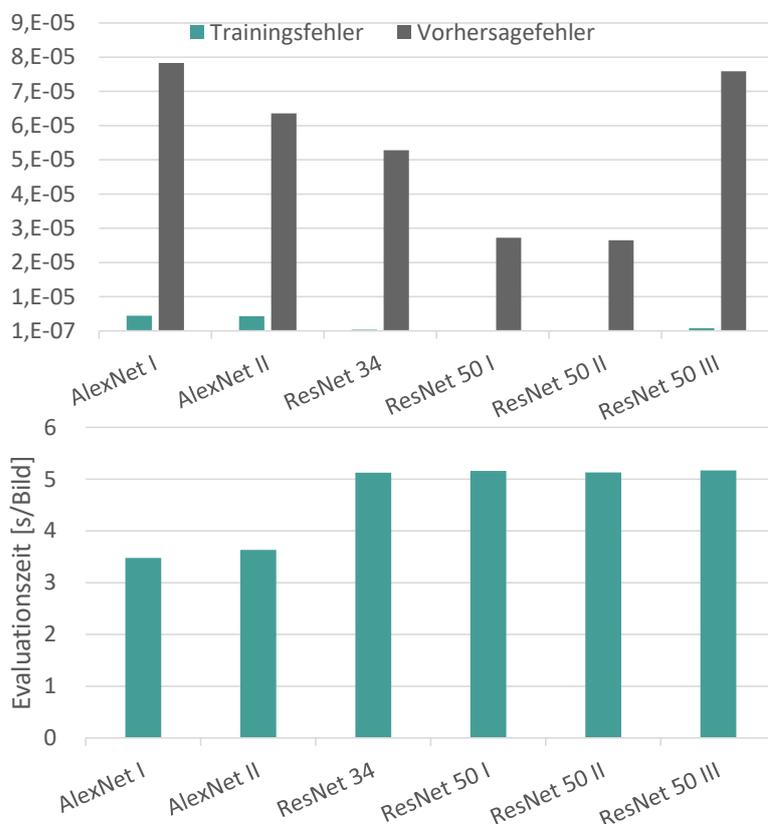


Abbildung 10: Oben: Gegenüberstellung der Trainingsgüte zur Vorhersagegüte der entwickelten Modelle zur Skelettierung; unten: Inferenzzeit pro Bild nach Modell aufgeführt

Daher wurde im Folgenden auf das Kinect v2.0 Software Development Kit von Microsoft zurückgegriffen und ein Demonstrator mit der Kinect-Kamera umgesetzt. Dafür wurde zunächst eine Posendatenbank für die in der Bewertungsmetrik enthaltenen Posen mit der Kinect Kamera in der IFA-Lernfabrik aufgenommen. In einem weiteren Schritt wurden die Posen annotiert und ein Modell zur Posenidentifikation mittels Random Forest Regression eintrainiert. Mit der Posenaufnahme und Evaluation wurde iterativ verfahren. Zusätzlich wurde eine Applikation mit grafischer Oberfläche in C# konzipiert und umgesetzt. Das oben erwähnte Posenidentifikationsmodell wurde dabei in die Applikation eingebunden. Des Weiteren wurde die in Arbeitspaket 2 entwickelte Bewertungsmetrik programmtechnisch umgesetzt und ebenfalls in die Applikation eingebunden. Als letztes erfolgte die Einbindung des in Arbeitspaket 2 definierten Maßnahmenkatalogs. Dafür wurde für jede der 90 Maßnahmen das Ergonomieprofil, d. h. die Erreichung verschiedener Ergonomiewerte nach Körperregionen sortiert und programmtechnisch hinterlegt. Mittels Case-Based-Reasoning (CBR) wird bei der Anwendung der

Maßnahmenableitung eine dem individuellen Ergonomiebewertungsprofil entsprechende Maßnahme inferenziert.

Des Weiteren wurde das ausgewählte Demonstratorkonzept, welches während des Arbeitspakets 2 entwickelt wurde, konkretisiert. D. h. es wurde eine ungefähre Konstruktion des Demonstratorkonzepts abgeleitet und durch eine Recherche marktverfügbarer Standardbauteile eine technische Zeichnung abgeleitet und eine Stückliste erstellt. Im Anschluss wurden die Teile des Demonstrators beschafft und der Demonstrator zusammengesetzt.

Ergebnisse

Im Rahmen von Arbeitspaket 3 wurde zunächst versucht, eine eigene dreidimensionale Skelettierungsmethode zur echtzeitfähigen Skelettierung bei humanoiden Bilddaten zu entwickeln. Dafür wurde zum einen eine Methode zur Erzeugung von randomisierten, synthetischen humanoiden dreidimensionalen Oberflächenmodellen entwickelt. Damit werden beliebig skalierbare Datensatzgrößen ermöglicht. Zum anderen wurde eine Methode entwickelt, um die Posen des CMU-Motion-Capturing-Datensatzes zu normalisieren und die synthetischen dreidimensionalen Oberflächenmodelle auf diese Posendaten anzupassen. Des Weiteren wurde eine Methode zur Konvertierung und Speicherung der mit o. g. Methoden erzeugten Daten entwickelt. Außerdem wurde eine dreidimensionale Skelettierungsmethode mittels neuronaler Netze entwickelt. Dessen Inferenzgeschwindigkeit blieb jedoch hinter den Anforderungen, d. h. der Sicherstellung einer echtzeitfähigen Ergonomieevaluation, an den Demonstrator zurück.

Weiterhin wurde ein Demonstrator, bestehend aus Hardware und Software, entwickelt, die benötigten Komponenten beschafft und die Konstruktion aufgebaut. Eine Darstellung des Demonstrators ist in Abbildung 11 zu sehen. Der Demonstrator umfasst eine transportierbare Konstruktion aus Aluminiumprofilen mit Möglichkeit zur Lagerung von Laptops, einer Teleskopstange mit Kameraadapter zur Kameramontage und Einstellung der Kameraposition in vertikaler Richtung sowie eine Time Of Flight 3D-Kamera vom Typ Kinect, Version 2 von Microsoft.

a)



b)

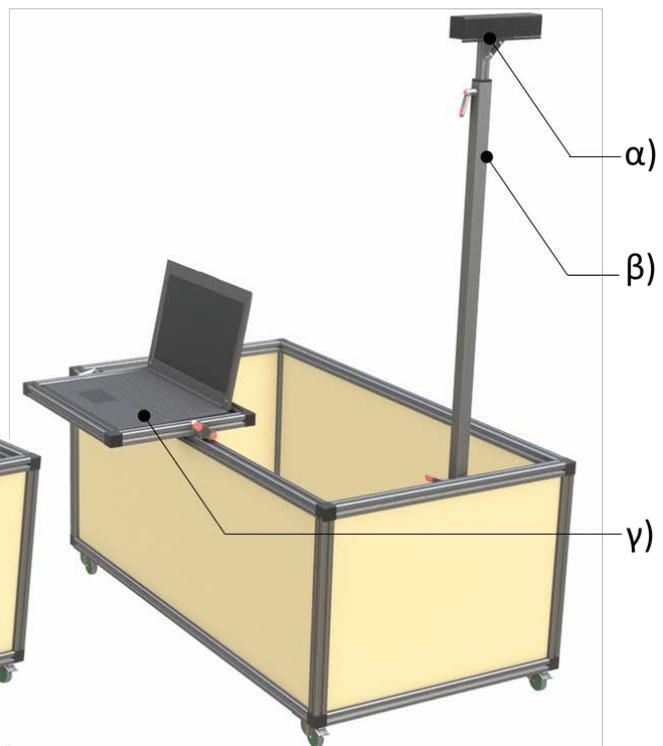


Abbildung 11: Konstruktive Ausführung des WorkCam Demonstrators, a) transportfähiger Zustand, b) einsatzbereiter Zustand, α) Kinect 3D-Kamera, β) Teleskopstange zur translatorischen Einstellung der Kameraposition, γ) Laptop zur Ausführung der EBS-Software

Auf dem Laptop befindet sich die entwickelte EBS-Software, aufbauend auf dem Kinect Version 2.0 Software Development Kit von Microsoft. Die EBS-Software wurde in C# als WPF-Applikation entwickelt, die grafische Benutzeroberfläche der entwickelten Applikation ist in Abbildung 12 dargestellt. Die entwickelte EBS-Software wurde so konzipiert, dass diese auf einem Laptop mit Windows-Betriebssystem lauffähig ist.



Abbildung 12: Bildschirmfoto der EBS-Software im Einsatz, a) Bedienelement zum Starten der Ergonomieanalyse, b) Bedienelement zur Auswertung und Maßnahmenableitung, c) Ampel-Indikator zur momentanen Ergonomiebewertung, d) Bewertungsaufschlüsselung

Damit die Persönlichkeitsrechte der zu evaluierenden Personen gewahrt werden, wurde auf eine Ausgabe des Kamerastreams verzichtet, da dieser sensitive und persönliche Informationen enthalten würde. Durch die exklusive Ausgabe der Tiefendaten mit einer überlagerten Darstellung der Skelettpositionen werden bis auf die individuellen Silhouetten der Mitarbeiter*innen keine persönliche Information aufgenommen. Die Komponenten der EBS-Software gestalten sich wie folgt: Neben dem Tiefendatenstream überlagert Skelettdarstellung kann zu einem beliebigen Zeitpunkt eine Ergonomieanalyse gestartet, pausiert oder gestoppt werden. Ein Ampel-Indikator gibt in Echtzeit die momentane Ergonomiebewertung wieder. Während es im oberen Teil der Oberfläche eine übersichtliche, nach Körperregionen zusammengefasste Ergonomiebewertung gibt, erfolgt im unteren Teil eine detaillierte Aufschlüsselung gemäß der implementierten, in Arbeitspaket 2 definierten Ergonomiebewertungsmetrik. Die detaillierte Aufschlüsselung dient insbesondere der Erhöhung der Nachvollziehbarkeit der angezeigten Ergonomiebewertung. Über ein Bedienelement ist zusätzlich die Maßnahmenableitung, welche nach erfolgter Ergonomiebewertung erfolgen kann, anzuzeigen. Die Maßnahmenableitung hat 90 Maßnahmen implementiert, die mittels der CBR-Methode auf Grundlage der Ergonomiebewertung eine passende Maßnahme inferenziert. In Abbildung 13 ist exemplarisch die Maßnahmenableitung dargestellt. Dabei ist zunächst die Hauptinformation, die Handlungsempfehlung dargestellt. Im konkreten Fall wird ein Training der Hals-Nacklen-Muskulatur vorgeschlagen. Darauf folgend ist im nächsten Abschnitt das erkannte Problem dargestellt, in diesem Falle eine verstärkte

Belastung des Oberkörpers durch ergonomisch ungünstige Haltung des Halses für längere Zeit. Im weiteren Abschnitt wird eine Maßnahmeneinschätzung gegeben, welche darüber aufklärt, wie nachhaltig die Maßnahme eingeschätzt wird, in welcher Umsetzungsdauer die Maßnahme durchgeführt werden kann, mit welchen relativen Kosten diese Maßnahme verbunden ist und welche Auswirkung von der Maßnahme auf die Arbeitsergonomie prognostiziert wird. In der vorletzten Sektion erfolgt die Einteilung in Verhältnis- und Verhaltensergonomie.

Maßnahmenempfehlung

Hauptinformationen

Handlungsempfehlung	Training der Hals-Nacken-Muskulatur	
---------------------	-------------------------------------	--

Problem

Handlungsfeld	Oberkörper / Kopf / Nacken	
Belastungsart	Statisches Halten	Frequenz
	✓	✓
Problemstellung	Ergonomisch ungünstige Haltung des Halses für längere Zeit / Ergonomisch ungünstige Bewegungen mit hoher Frequenz	

Maßnahmeneinschätzung

Bereich	Nachhaltigkeit	Umsetzungsdauer	Kosten	Auswirkung auf Arbeitsergonomie
Einschätzung				

Wirksrichtung Gestaltungsfeld

Gestaltungsfeld	Verhältnisergonomie		Verhaltensergonomie
	Arbeitsgestaltung- und Organisation	Arbeitsplatz und Ausrüstung	
Relevanz	✗	✗	✓

Legende:

- = Merkmal ist stark ausgeprägt
- = Merkmal ist durchschnittlich ausgeprägt
- = Merkmal ist schwach ausgeprägt

Ergonomie analysieren

Ergonomiewerte:

- Kopf+Nacken: 63
- Schulter+Arme: 16
- Torso: 44
- Beine: 0
- Gesamt: 123

Ergonomieauswertung / Maßnahmenableitung

Bewertung zurücksetzen

Kopf Ink-Reklination: 22
 Kopf Rotation: 32
 Kopf LatFlex: 9
 Schulter Arme Flexion: 5
 Schulter Arme Abduktion: 4
 Schulter Arme Extension: 7
 Schulter Arme Adduktion: 0
 Torso Flexion: 37
 Torso Lateralflexion: 4
 Torso Rotation: 3
 Kniebeuge stehend: 0
 Kniebeuge sitzend: 0

Abbildung 13: Einbindung der Maßnahmenableitung in den Programmablauf

3.4 Arbeitspaket 4: Validierung und Optimierung des Demonstrators unter Realbedingungen

Ziel von Arbeitspaket 4 ist die Validierung und Optimierung des in Arbeitspaket 3 entwickelten und umgesetzten Demonstrators unter Test- und Realbedingungen.

Vorgehen:

Zur Untersuchung der Tauglichkeit des Demonstrators wurden zunächst Untersuchungen in der IFA-Lernfabrik durchgeführt. Hierbei wurde ein Modellarbeitsplatz mit einem exemplarischen Montagearbeitsprozess, die Montage eines Helikopterbausatzes, aufgebaut. Dabei wurden die zu verwendenden Materialien und Werkzeuge in unterschiedlichen Konstellationen platziert. Somit wurden auf der einen Seite unterschiedliche Montagearbeitsplatzszenarien durch

verschiedene Greifräume, variierende Arbeitshöhen und wechselnde Lokalisation der Arbeitsprozesse simuliert. Auf der anderen Seite konnten damit unterschiedliche Bedingungen getestet werden. Diese beinhalten sowohl die Einflüsse auf die Kameraoptik, durch z. B. wechselnde Hintergründe und unterschiedlichen Beleuchtungssituationen als auch die Einflüsse auf die Software durch variierende Kamerapositionierung, unterschiedliche Testpersonen und unterschiedliche Arbeitsumgebungen. Die Begutachtung des Montagearbeitsplatzes wurde von unterschiedlichen Richtungen aus durchgeführt. Zur Validierung wurde zusätzlich zu den von dem entwickelten *WorkCam*-Demonstrator erstellten Ergonomieanalysen eine herkömmliche Kameraaufnahme durchgeführt. Im Anschluss wurde eine überlagerte Darstellung der *WorkCam* mit den normalen Kameraaufnahmen durchgeführt. Somit war zum einen eine nachgelagerte Analyse der Montage durch einen Ergonomieexperten möglich, zum anderen konnte ein Vergleich der Ergonomiebewertung des kamerabasierten EBS mit einer manuell durchgeführten Ergonomiebewertung verglichen werden. Hierbei konnte für einzelne Montagesequenzen die vergebene Metrik bzw. die detektierte Haltung mit der Expertenmeinung evaluiert werden. Die Durchführung der Evaluationsuntersuchungen ist in Abbildung 14 dargestellt: Während der Fertigung des Modellhubschraubers an einem Montagearbeitsplatz sind verschiedene Arbeitsmittel und Halbzeuge um den ausführenden Mitarbeiter platziert. Der *WorkCam*-EBS-Demonstrator evaluiert den Mitarbeiter aus einer frontalen Position mit einer Kamerahöhe von 1,5 m.



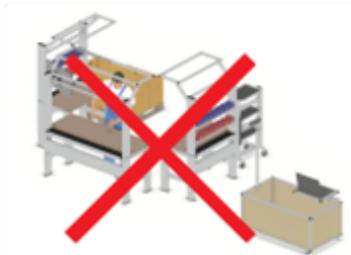
Abbildung 14: Durchführung von Evaluationsuntersuchungen in der IFA-Lernfabrik

Während der Evaluationsphase wurden am *WorkCam-EBS-Demonstrator* Optimierungspotentiale entdeckt und dessen Restriktionen bzw. Einsatzmöglichkeiten evaluiert. Durch extensives Testen des *WorkCam-EBS-Demonstrators* in der IFA-Lernfabrik konnten somit z. B. Anpassungen an den Detektionsschwellen individueller Bewegungen durchgeführt werden. Bei den Tests in der IFA-Lernfabrik sowie in der Produktion wurden folgende Restriktionen festgestellt: Hellweiße Kleidung stellte sich, genauso wie stark reflektierende Flächen im Hintergrund in Kombination mit hellem, einfallenden Licht, als Herausforderungen für die Kameratechnologie heraus. Zusätzlich haben sich im Bereich der EBS-Software Okklusionen von Körperteilen, wie diese z. B. beim sitzenden Arbeiten mit den Beinen unter einem Arbeitstisch auftreten, als nicht kompensierbar herausgestellt. In diesen Fällen wurde das skelettale Tracking fehleranfällig bzw. versagte es. Die festgestellten Optimierungspotentiale, d. h. die Feineinstellung der Detektionsgrenzen und Anpassung der Bewertungsmetrik, wurden anschließend weiter in den EBS-Demonstrator eingepflegt. Die beobachteten Restriktionen des kamerabasierten Ergonomieverfahrens machten eine Neuanpassung der Bewertungsmetrik notwendig, da nicht alle konzipierten Bewertungsstufen sicher detektiert werden konnten. Zur Kompensation wurden ausgewählte Bewertungsstufen in den betreffenden Bewertungsbereichen

zusammengefasst. Des Weiteren wurden die kameratechnologisch bedingten Restriktionen zusammen mit einer Anleitung zur Benutzung des EBS-Demonstrators in einem Anwendungsleitfaden festgehalten.

Ergebnisse

Die Ergebnisse von Arbeitspaket 4 sind auf der einen Seite die iterativ optimierte, einsatzangepasste EBS-Software, die Evaluation und Validierung der Software auf Grundlage der in Arbeitspaket 1 definierten Kriterien und auf der anderen Seite wurde ein Anwendungsleitfaden zum Aufbau und Betrieb des Demonstrators angefertigt. Der Anwendungsleitfaden wurde dabei mit ausdrucksstarker Zeichensprache gestaltet, sodass dieser zum einen den schnellen, leichten Einstieg in den Zusammenbau und Betrieb des Demonstrators ermöglicht und zum anderen über mögliche Restriktionen bzw. Einstellmöglichkeiten des Demonstrators unterrichtet. Ein ausgewählter Ausschnitt des Anwendungsleitfadens zur richtigen Positionierung des Demonstrators ist in Abbildung 15 zu betrachten. Durch klare, einfache Zeichensprache und einen kurzen Informationszusatz in schriftlicher Form wird mit Hilfe des Anwendungsleitfadens der Schnelleinstieg in die Benutzung des entwickelten EBS ermöglicht. Des Weiteren sind in dem erstellten Anwendungsleitfaden die Benutzung und Einstellung der entwickelten EBS-Software thematisiert, sodass eine schnelle Einarbeitung ermöglicht wird.



Seitliche Positionierung und Obstruktion durch Fertigungsanlagen vermeiden



Positionierung von hinten generiert Obstruktion der Arme / Hände bei Arbeiten direkt auf dem Tisch: Falls möglich, vermeiden



Frontale Positionierung zur ausgeübten Tätigkeit



Kamera zu nah an der zu evaluierenden Person positioniert



Kamera zu weit von der zu evaluierenden Person entfernt



Optimales Einrahmen des Arbeitsplatzes: So nah wie möglich, so weit entfernt wie nötig

Abbildung 15: Ausschnitt des Anwendungsleitfadens, hier gezeigt: Positionierung des Demonstrators und Einstellung der Kamera

3.5 Arbeitspaket 5: Projektkoordination und Transfer der Ergebnisse

Ziel des Arbeitspaket 5 ist die Dokumentation der im Rahmen dieses Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse und der Transfer dieses Wissens in die Praxis.

Vorgehen:

Projektbegleitend wurden vier Treffen des PAs von den leitenden Projektingenieuren organisiert und durchgeführt. Die Mitglieder des PA als Repräsentanten der in der Wirtschaft agierenden Unternehmen wurden zu Projektrichtungsfragen konsultiert und bei der Projektlenkung berücksichtigt. So wurde z. B. auf die Entwicklung eines Handmodells in Absprache mit dem PA verzichtet. Die erzielten Ergebnisse wurden im Rahmen der PA-Treffen durch Präsentation und anschließendes Herstellen der Online-Verfügbarkeit in die Unternehmen transferiert. Des Weiteren wurden Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften, welches einen Transfer der Ergebnisse in die Forschung und Wissenschaft gewährleistet, verfasst und veröffentlicht.

Ergebnisse:

Die detaillierten, durchgeführten Transfermaßnahmen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der Projektlaufzeit wurden bereits erste Maßnahmen des Ergebnistransfers in die Wirtschaft umgesetzt. Zur fortführenden Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse sind nach Projektabschluss weitere Transfermaßnahmen durchgeführt worden wie eine Pressemitteilung, eine Bekanntmachung über Social-Media sowie ein Beitrag in der Zeitschrift Fördern und Heben. Durch die Diskussionen während der PA-Treffen mit den Mitgliedsunternehmen und weiteren interessierten Unternehmen fand bereits ein Wissenstransfer statt. Eine Liste der Mitgliedsunternehmen des PA ist der angehängten Nachweisdokumentation zu entnehmen. Die durchgeführten Transfermaßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Während und nach der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
Informationen der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses im Rahmen der PA-Sitzungen	KickOff-Treffen	31.05.2017
	2. Projekttreffen bei der Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG	18.04.2018
	3. Projekttreffen	14.05.2019
	4. Projekttreffen	09.05.2019
Projektbezogene Homepage	workcam.iph-hannover.de	kontinuierlich
Weiterbildungsmaßnahmen	Betreuung studentischer Arbeiten während der Projektlaufzeit (siehe Abschnitt 7 – Projektarbeiten)	während der Projektlaufzeit
	Betreuung eines Praktikums	03/2018 – 07/2018
Schulungen	Nutzen der Erkenntnisse im Rahmen des IFA Weiterbildungsprogramms für Fach- und Führungskräfte in der IFA-Lernfabrik	kontinuierlich (teilweise bereits erfolgt)
Multiplikatoren	Bekanntmachung der Forschungsergebnisse in der Wirtschaft	kontinuierlich (teilweise bereits erfolgt)
Zwischenberichte	Information der GVB über aktuellen Stand	April 2018 und April 2019
Veröffentlichung von Informationen für die Öffentlichkeit	Pressemitteilung: „Ergonomie am Arbeitsplatz: Kamera erkennt ungesunde Bewegungen“	2017

	Bellmann, V. K.; Brede, S.; Nyhuis, P. (2017): Ergonomiebewertung 4.0 - Echtzeitfähige und kamerabasierte Ergonomiebewertung und Maßnahmenableitung in der Montage, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 112 (9), p. 588-592	2017
	Bellmann, V.K., Majid Ansari, S., Nyhuis, P., Brede, S., 2017. Development of a System for a Real Time Ergonomic Assessment. In: International Conference on Production Automation and Mechanical Engineering ICPAME	2017
	Reichert, S.; Brede, S.: 3D-Kameras bewerten Ergonomie in der Montage. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 17 / Dezember 2017, ISSN: 2198-1922.	2017
	Pressemitteilung „Digitaler Ergonomiebewerter erkennt ungesunde Bewegungen“	12/2019
	Instagram Posting auf IPH-Instagram - Account	12/2019
	Brede, S.; Gohlke, J, Reichert, S.: Ergonomiebewertung per 3D-Kamera. In: Fördern und Heben, (2020)	02/2020
Abschlussbericht	Zusammenfassung der Projektergebnisse im vorliegenden Abschlussbericht	erstellt Dezember 2019

5 Literaturverzeichnis

- [§2ArbSchG] §2 Absatz 1 Satz 1 ArbSchG
- [And14] Andriluka, M. ; Pishchulin, L. ; Gehler, P. ; Schiele, B. : 2D Human Pose Estimation: New Benchmark and State of the Art Analysis. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014
- [Arn00] Arnold, J. (2000). APALYS – eine Möglichkeit zur Berechnung der Wirbelsäulenbelastung beim Heben von Lasten. Die Säule – Gesunder Rücken – besser Leben 10 (2), S. 30-33.
- [Bas08] Bastioni, M. ; Re, S. ; Misra, S. : Ideas and Methods for Modeling 3D Human Figures: The Principal Algorithms Used by MakeHuman and Their Implementation in a New Approach to Parametric Modeling. In: Proceedings of the 1st Bangalore Annual Compute Conference, COMPUTE '08. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2008. — event-place: Bangalore, India — ISBN 978-1-59593-950-0
- [BGHM] Berufsgenossenschaft Holz und Metall: <https://www.bghm.de/arbeitschuetzer/fachinformationen/ergonomie-und-arbeitsplatzgestaltung/#main-menu-rwd> abgerufen
- [BMW17] BMWi, (n.d.): Verteilung volkswirtschaftlicher Kosten aufgrund gesundheitsbedingten Produktionsausfällen in Deutschland nach Diagnosegruppen 2014, Statista - Das Statistik-Portal (2017)
- [Bon95] Bongwald, O., Luttmann, A., & Laurig, W. (Dezember 1995). Leitfaden für die Beurteilung von Hebe- und Tragetätigkeiten - Gesundheitsgefährdung, gesetzliche Regelungen, Meßmethoden, Beurteilungskriterien und Beurteilungsverfahren. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVGB).
- [Bul94] Bullinger, H.-J. (1994). Ergonomie Produkt und Arbeitsplatzgestaltung. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- [Caf99] Caffier, G. S. (1999). Praxisorientiertes Methodeninventar zur Belastungs- und Beanspruchungsbeurteilung im Zusammenhang mit arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Bremerhaven: NW Wirtschaftsverlag.
- [CMU10] Carnegie Mellon University - CMU Graphics Lab - motion capture library. URL <http://mocap.cs.cmu.edu>
- [Col02] Colombini, D., & Occipinti, E. a. (2002). Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs. Job Analysis, Ocra Risk Indices, Prevention Strategies and Design Principles. Amsterdam et al.: Elsevier B. V.
- [DAK18] DAK, (n.d.): Anteile der zehn wichtigsten Krankheitsarten an den Arbeitsunfähigkeitstagen in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2017, Statista - Das Statistik-Portal (2018)
- [DGU07] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (2007). BGI-/GUV-I 7011. Gesunder Rücken – Gesunde Gelenke: Noch Fragen? Gesund und fit im Kleinbetrieb, BG-Information. Köln: Carl Heymanns Verlag.
- [DGU09] BGI-/GUV-I 504-46. Handlungsanleitung für die arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 46. – Belastungen des Muskel- und Skelettsystems einschließlich Vibrationen. BG-Information. Köln: Carl Heymanns Verlag, Köln.
- [DIN00] DIN ISO: 11226. (2000). Ergonomie – Evaluierung von Körperhaltungen bei der Arbeit.
- [DIN07] DIN EN 1005-5. (2007). Sicherheit von Maschinen Menschliche körperliche Leistung Teil 5: Risikobeurteilung für kurzzyklische Tätigkeiten bei hohen Handhabungsfrequenzen.

- [DIN09b] DIN EN 1005-2. (2009). Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 2: Manuelle Handhabung von Gegenständen in Verbindung mit Maschinen und Maschinenteilen.
- [DIN09c] DIN EN 1005-3 . (2009). Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 3: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung.
- [DIN16] DIN EN ISO. (2016). DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeits-systemen (ISO 6385:2016).
- [DIN99] DIN 33411-5 . (1999). Körperkräfte des Menschen – Teil 5: Maximale statische Aktionskräfte, Werte.
- [Eff01] Effenberger G. et al. (2001). Grundsätze der Ergonomie bei Bildschirmarbeit. In: Blaha F. (eds) Trends der Bildschirmarbeit. Springer, Wien.
- [Fab18] Fabbri, M. ; Lanzi, F. ; Calderara, S. ; Palazzi, A. ; Vezzani, R. ; Cucchiara, R. : Learning to Detect and Track Visible and Occluded Body Joints in a Virtual World. In: arXiv:1803.08319 [cs] (2018)
- [Ghe07] Ghezel-Ahmadi, K., & Schaub, K. (2007). PRAXIS – Bewertung der körperlichen Belastungen am Arbeitsplatz mit dem IAD-BkB (R) im Rahmen des ERATarifwerks. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 61, S. S. 255-262.
- [Gol08] Goldscheid, C. (2008). Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung in manuellen Kommissioniersystemen. Aachen: Shaker Verlag.
- [Grö12] Grölllich, D. (2012). Abschlussbericht zum AIF – ZIM – Kooperationsprojekt „PointCloud-4D Entwicklung der Verfahren der automatischen 3D-Bewegungsanalyse auf Basis von 3D-Kameras“. Dresden, Dresden: Technische Universi-tät Dresden.
- [Gro19] Groos, S., Fuchs, M., & Kluth, K. (2019). Belastungs- und Beanspruchungsanalyse beim Einsatz eines passiven Exoskelettes zur Bein- und Rückenunterstützung während simulierter Montagetätigkeiten.
- [Gün14] Günthner, W. A., Deuse, J., Rammelmeier, T., & Weisner, K. (2014). Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiterbelastungen in Kommissioniersystemen (ErgoKom).Forschungsbericht. München, München: fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.
- [Gut96] Gutzmann, C., Kirchner, J.-H., & Wolberg, K. (1996). Europäische Normen zur Ergonomie : Bestandsaufnahme und Systematisierung. Verein zur Förderung der Arbeitssicherheit in Europa e.V.
- [Hei99] Heidinger F, Jaspert B, Duelli B (1999). Ergonomie und Arbeitsmedizin. In: Hüter-Becker A, Schewe H, Heipertz W (Hrsg) Biomechanik, Arbeitsmedizin, Ergonomie. Thieme, Stuttgart.
- [Hin14] Hincapié-Ramos, J. D., Guo, X., Moghadasian, P., & Irani, P. (2014). Consumed Endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-air Interactions. CHI'14 CHI Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Com-puting Systems, S. 1063–1072.
- [HSE02] Health and Safety Executive (HSE). (2002). Upper limb disorders in the work-place. Abgerufen am 08.08.2016 von www.hse.gov.uk/pUbns/priced/hsg60.pdf
- [HSE07] Health and Safety Executive (HSE). (2007). Ergonomics and human factors at work. A brief guide. Abgerufen am 08.08.2016 von www.hse.gov.uk/pubns/indg90.pdf
- [Hue05] Huelke, M. (2005). Einführung zur Ergonomie : Grundlagen, Normung, Nutzen. Lengfurt, BGIA.
- [Ion14] Ionescu, C. ; Papava, D. ; Olaru, V. ; Sminchiescu, C. : Human3.6M: Large Scale Datasets and Predictive Methods for 3D Human Sensing in Natural Environments. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Bd. 36 (2014), Nr. 7, S. 1325–1339
- [ISO03] ISO 11228-1 . (2003). Ergonomics . Manual handling. Part 1: Lifting and carrying.

- [ISO07a] ISO 11228-2 . (2007). Ergonomics. Manual handling. Part 2: Pushing and pulling.
- [ISO07b] ISO 11228-3 . (2007). ISO 11228-3 Ergonomics. Manual handling. Part 3: Handling of low loads at high frequency.
- [Ji13] Ji, S. e. (2013). 3D Convolutional Neural Networks for Human Action Recognition. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*(35.1), S. 221-231.
- [Kam96] Kamusella, C. (1996). Erste Erfahrungen mit Analyseinstrumentarien zur Bewertung arbeitsbedingter Wirbelsäulenbelastungen an Praxisbeispielen, 41. IWK der TU Ilmenau, Tagungsmaterial, S. 736-741. (Bd. 2).
- [Kar77] Karhu, O., Kansu, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures practical method für analysis. *Applied Ergonomics* 8, pp. 199-201.
- [Kel13] Kelterborn, M., & Koch, M. G. (2013). Physische Belastung in der Produktionslogistik. Geeignete Verfahren zur Beurteilung der physischen Belastung für Arbeitsplätze in der Produktionslogistik. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (11) S. 846-849.
- [Kop12] Koppula, H. S. ; Gupta, R. ; Saxena, A. : Learning Human Activities and Object Affordances from RGB-D Videos. In: *CoRR* Bd. abs/1210.1207 (2012)
- [Krü15] Krüger, J., & Nguyen, T. D. (2015). Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 64 (1), pp. 9–12.
- [Kug10a] Kugler, M. e. (2010). Ergonomie in der Industrie - aber wie? Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements.
- [Kug10b] Kugler, M., Bierwirth, M., Schaub, K., Sinn-Behrendt, A., Feith, A., Ghezal-Ahmadi, K., & Bruder, R. (2010). *KoBRA – Ergonomie in der Industrie – aber wie? Kooperationsprogramm zu normativem Management von Belastungen und Risiken bei körperlicher Arbeit*. Darmstadt: Institut für Arbeitswissenschaften der Technischen Universität Darmstadt.
- [Lan17] Lange, W., & Windel, A. (2017). Kleine Ergonomische Datensammlung. Unter Mitarbeit von Bleyer, T., Bux, K., Krüger, J., Kurtz, P., Lafrenz, B., Lazarus, H. und Wischniewski. Köln: TÜV Media (Praxiswissen Arbeitssicherheit).
- [Lat13] Latniak, E., & Hentrich, J. (2013). Herausforderungen des demografischen Wandels für fertigende Betriebe und deren Beschäftigte. In J. u. Hentrich, Herausforderungen des demografischen Wandels für fertigende Betriebe und deren Beschäftigte (S. 9-23). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [Lau92] Laurig, W. (1992). Grundzüge der Ergonomie. Erkenntnisse und Prinzipien. 4. Aufl. Berlin: Beuth (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).
- [LeC89] LeCun, Y. e. (1989). Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural computation*(1.4).
- [Mar17] Martinez, J. et al.: A simple yet effective baseline for 3d human pose estimation. In: *CoRR*, vol. abs/1705.03098 (2017). <http://arxiv.org/abs/1705.03098>, Zuletzt aufgerufen am 2. 3. 2019.
- [Mar19] Marschall, J., Hildebrandt, S., & Nolting, H.-D. (2019). *DAK-Gesundheitsreport 2019*.
- [McA93] McAtamney, L., & Corlett, N. (1993). RULA – A survey method for investigation if work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics* 24 (2) , S. 91-99.
- [Meh17] Mehta, D. e. (2017). VNect: real-time 3D human pose estimation with a single RGB camera. *ACM Trans. Graph*(36), S. 44:1-44:14.
- [Moo95] Moore, J. S., & Garg, A. (1995). The Strain Index: A Proposed Method to Analyze Jobs for Risk of Distal Upper Extremity Disorders. *American Industrial Hygiene Association* 56, S. 443-458.
- [MTM17] MTM-HWD. (2017). *Arbeitsgestaltung mit MTM - HWD*.
- [Ngu15] Nguyen, T. D., & Seliger, G. (2015). Adaptive Qualification and Assistance Modules for Manual Assembly Workplaces. *Procedia CIRP* (26), 115–120.

- [NIO81] NIOSH. (1981). (National Institute for Occupational Safety and Health: Work Practices Guide for Manual Lifting. Cincinnati (Ohio, USA): US Department of Health and Human Services.
- [Of113] Ofli, F. ; Chaudhry, R. ; Kurillo, G. ; Vidal, R. ; Bajcsy, R. : Berkeley MHAD: A Comprehensive Multimodal Human Action Database. In Proceedings of the IEEE Workshop on Applications on Computer Vision (WACV), 2013
- [Pos08] Post, A. (2008). Motion capture. Funktionsweise von Motion-Capture-Systemen und Anforderungen an Motion-Capture-Aufzeichnungen. Saarbrücken: VDM-Verl. Müller.
- [REFA16] REFA-Institut. (2016). Arbeitsorganisation erfolgreicher Unternehmen – Wandel in der Arbeitswelt. Darmstadt: Hanser.
- [REFA91] REFA. (1991). (Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung) Methodenlehre der Betriebsorganisation. Grundlagen der Arbeitsgestaltung. München: Hanser Verlag.
- [Rüh04] Rühmann, H. P. (2004). Ergonomische Prüf- und Bewertungsverfahren. Ergonomie aktuell, 21.
- [Sch02] Schaub, K., & G.Winter. (2002). Design-Check Ein Screeningverfahren zur Beurteilung körperlicher Belastungen. Der Orthopäde.
- [Sch04a] Schaub, K. (2004). Das «Automotive Assembly Worksheet» (AAWS). In K. Landau, Montageprozesse gestalten: Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation. Stuttgart: Ergonomia Verlag, S. 91-111.
- [Sch04b] Schaub, K., & Landau, K. (2004). Ergonomie und Prävention in der betrieblichen Praxis.
- [Sch07] Schaub, K., & Ghezal-Ahmadi, K. (2007). Vom AAWS zum EAWS – ein erweitertes Screening-Verfahren für körperliche Belastungen. 53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), S. 601-604.
- [Sch10a] Schaub, K., Caragnano, G., Britzke, B., & Bruder, R. (2010). The European Assembly Worksheet. Proceedings of the VIII International Conference on Occupational Risk Prevention.
- [Sch10b] Schaub, K., Haaß, P., Bierwirth, M., Kugler, M., Steinberg, U., Kaltbeitzel, J., . . . Bruder, R. (2010). Das Multiple-Lasten-Tool: integrierte Bewertung unterschiedlicher Arten manueller Lastenhandhabung. Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau. GfA-Herbstkonferenz.
- [Sch14] Schmickartz, S. (2014). Schmickartz, S. (2014): Anwendungsgebiete des Motion Capture in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses zur Ergonomiebewertung. Aachen: Shaker Verlag.
- [Sch18] Schlick, C. e. (2018). Ergonomische Gestaltung. In C. B. Schlick, Arbeitswissenschaft (S. 417-549). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [Sha16] Shahroudy, A. ; Liu, J. ; Ng, T.-T. ; Wang, G. : NTU RGB+D: A Large Scale Dataset for 3D Human Activity Analysis. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016
- [Sig10] Sigal, L. ; Balan, A. ; Black, M. J.: HumanEva: Synchronized video and motion capture dataset and baseline algorithm for evaluation of articulated human motion. In: International Journal of Computer Vision Bd. 87 (2010), Nr. 1, S. 4–27
- [Ste07] Steinberg, U., Behrendt, S., Caffier, G., Schultz, K., & Jakob, M. (2007). Leitmerkmalmethode Manuelle Arbeitsprozesse. Erarbeitung und Anwendungserprobung einer Handlungshilfe zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- [Ste89] Steinberg, U., Caffier, G., Mohr, D., Liebers, F., & Behrendt, S. (1989). Modellhafte Erprobung des Leitfadens Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten. Bremerhaven: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. NW Wirtschaftsverlag.

- [Sto85] Stoffert, G. (1985). Analyse und Einstufung von Körperhaltungen bei der Arbeit OWAS-Methode. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 39 (1).
- [Tom14] Tompson, J. e. (2014). Efficient Object Localization Using Convolutional Networks. CoRR, vol. abs/1411.4280. Von <http://arxiv.org/abs/1411.4280> abgerufen
- [Tos13] Toshev, A., & Szegedy, C. (2013). DeepPose: Human Pose Estimation via Deep Neural Networks. In: CoRR, vol. abs/1312.4659. Von <http://arxiv.org/abs/1312.4659> abgerufen
- [Vis18] Viscircle-GmbH. (2018). Einsteigeruide: Was versteht man eigentlich unter Motion Capture? Von <https://viscircle.de/einsteigeruide-was-versteht-man-eigentlich-unter-motion-capture/> abgerufen
- [Wat93] Waters, T., Putz-Anderson, V., Fine, L., & Garg, A. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. In: Ergonomics 36 (7), S. 749-776.
- [Wat94] Waters, T., Fine, L., Putz-Anderson, V., & Garg, A. (1994). Applications manual for the revised NIOSH lifting equation. Cincinnati (Ohio, USA): U.S. Dept. of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health.
- [Wie14] Wiendahl, H.-P. R. (2014). Handbuch Fabrikplanung. München Wien: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- [Win94] Winkel, J., Mathiassen, S. (1994). Assessment of physical work load in epidemiologic studies: Concepts, issues and operational considerations. In: Ergonomis 37, S. 979-988.
- [Xse18] Xsens Technologies B.V. An introduction to the beginning of motion capture technology. Abgerufen am 2018 von <https://www.xsens.com/fascination-motion-capture/>
- [Zho17] Zhou, X. et al.: Weakly-supervised Transfer for 3D Human Pose Estimation in the Wild. In: CoRR, vol. abs/1704.02447 (2017). <http://arxiv.org/abs/1704.02447>, Zuletzt aufgerufen am 2. 5. 2019.