

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20465 N

Thema

Tracking von Bewegungsabläufen für eine individualisierte, arbeitsplatzunabhängige Ergonomieanalyse

Berichtszeitraum

01.01.2019-30.06.2021

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.
Schlachte 31
28195 Bremen

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:
Technische Universität Hamburg
Institut für Produktionsmanagement und -technik
Denickestraße 17
21073 Hamburg

Forschungseinrichtung 2:
BG Klinikum Murnau gGmbH
Prof.-Küntscher-Straße 8
82418 Murnau am Staffelsee

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	1
2. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU	3
2.1. Innovativer Beitrag.....	3
2.2. Industrielle Anwendungsmöglichkeiten	3
2.3. Weiterentwicklung	3
3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	5
3.1. AP 1 Definition der Bewegungsübungen zur Fähigkeitsanalyse der Mitarbeiter.....	5
3.2. AP 2 Datenerfassung und -aufbereitung	6
3.3. AP 3 Entwicklung der generischen Fähigkeitsanalyse	8
3.4. AP 4 Generische Anforderungsanalyse	9
3.5. AP 5 Fähigkeits- und Anforderungsabgleich	11
3.6. AP 6 Vorgehen zur systematischen Maßnahmenableitung	14
3.7. AP 7 Evaluation des Gesamtsystems	15
4. Zuwendungsverwendung und Angemessenheit.....	16
4.1. Verwendung der Zuwendung.....	16
4.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	16
5. Vorstellung der Analysemethode	18
5.1. Ziele	18
5.2. Hardware und Software	18
5.3. Vorgehen.....	18
5.4. Fähigkeitsanalyse	19
5.4.1. Aufnahme der Bewegungsübungen	19
5.4.2. Ermittlung der Handgriffkraft.....	19
5.4.3. Ermittlung der individuellen Fähigkeiten	20
5.4.4. Fähigkeitsprofil	20
5.4.5. Bewertung der Fähigkeitsanalyse:	21
5.5. Anforderungsanalyse.....	21
5.5.1. Datenerfassung am Arbeitsplatz	21
5.5.2. Datenaufbereitung.....	22
5.5.3. Bewegungstransformation.....	23
5.5.4. Ermittlung der Beanspruchung	23
5.5.5. Individuelle Arbeitsplatzbeurteilung	25
5.5.6. Bewertung der Anforderungsanalyse	27
5.6. Maßnahmenableitung	28
5.6.1. Maßnahmenkatalog zur systematischen Maßnahmenableitung	28

5.6.2. Bewertung der Maßnahmenableitung.....	29
6. Literaturverzeichnis.....	30
7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	31
8. Zusammenstellung aller veröffentlichten Arbeiten.....	33
9. Angaben über gewerbliche Schutzrechte.....	33
10. Förderhinweis	33

1. Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Ergonomieanalyse, die die individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter mit den Anforderungen des Arbeitsplatzes koppelt. Diese neuartige Form der Ergonomieanalyse sollte hierzu die individuelle Belastbarkeit und Bewegungsfähigkeit der Mitarbeiter erfassen, die individuellen Anforderungen der Arbeitsplätze an die Belastbarkeit und Beweglichkeit berechnen, die Fähigkeiten mit den Anforderungen vergleichen und dabei die muskuloskelettalen Belastungen der Mitarbeiter ermitteln. Die Analyseergebnisse sollten dazu genutzt werden, Arbeitsplätze ergonomisch zu verbessern, sie individuell an den Mitarbeiter anzupassen und Arbeitsplätze zu identifizieren, die sich für individuelle Mitarbeiter mit spezifischen Einschränkungen besonders gut eignen.

Als zentrale Technologie sollten ursprünglich 3D-Kameras eingesetzt werden, um die Bewegungen der Mitarbeiter aufzuzeichnen. Untersuchungen mit der Intel RealSense D415 und D435 sowie dem iPad Pro (2020) haben jedoch ergeben, dass die Algorithmen zur Bewegungserkennung noch nicht ausgereift genug sind, um die im Projekt erforderliche Erfassungsgüte zu liefern. Aus diesem Grund wurde für die Bewegungserfassung ein Inertialsensorsystem (XSens MTw Awinda) verwendet, das hierfür aus institutseigenen Mitteln finanziert wurde, um den Erfolg des Forschungsvorhabens zu ermöglichen. Die Inertialsensoren sind in einem Motion-Tracking-Anzug integriert und ermöglichen es, Bewegungen in hoher Auflösung und Qualität zu erfassen. So konnten die Arbeitsprozesse aufgenommen und die Fähigkeitsanalyse der Mitarbeiter durchgeführt werden. Die individuelle maximale Belastbarkeit wurde im Zuge einer Handkraftmessung mittels Handkraftdynamometer abgeschätzt.

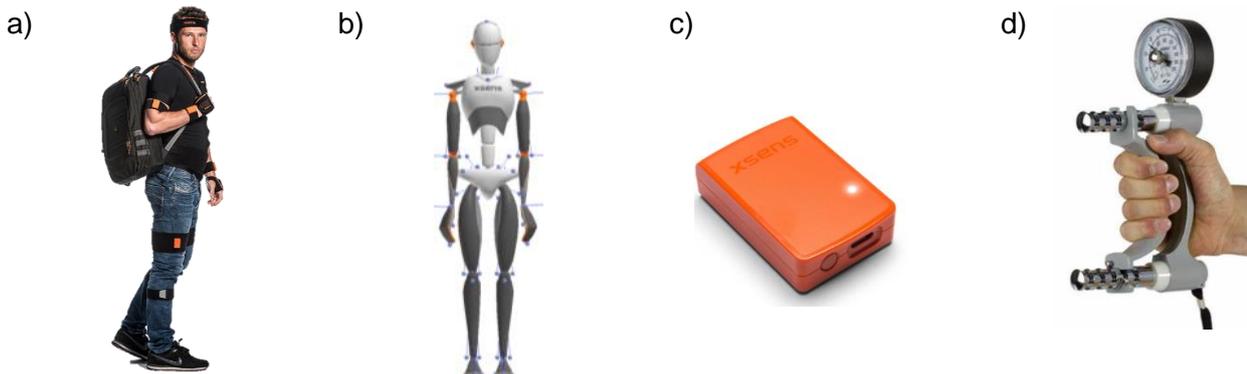


Abbildung 1: a) XSens MTw Awinda (nach Reallusion, 2021) b) erzeugtes Menschmodell (nach Schepers, 2018), c) Motion Tracker (nach Paulich, 2018) und d) Handkraftdynamometer (nach SAEHAN, 2021)

Mithilfe personenbezogener (Geschlecht, Alter, Gewicht) und prozessbezogener (Werkzeug- und Bauteilgewichte) Metadaten konnte ein Vorgehen entwickelt werden, das individuelle Fähigkeitsprofile der Mitarbeiter erstellt, die individuelle Belastung am Arbeitsplatz berechnet und über den Vergleich von Fähigkeit und Belastung auf die individuelle Beanspruchung schließt. Die Bewertung der Arbeitsplatzergonomie erfolgte für die ergonomisch besonders kritischen Gelenke hinsichtlich der Gelenkbeweglichkeit (aktueller Zustand im Vergleich zur maximalen Beweglichkeit), der Belastung (individuelle Belastungsgrenze wird durch die Handkraftmessung abgeschätzt) und statischer Haltungen. Die Analyse ist damit in der Lage, die kritischen Arbeitsschritte und die Körperbereiche, die an einem Arbeitsplatz besonders stark beansprucht werden, zu identifizieren. Ein Maßnahmenkatalog unterstützt den Anwender in der ergonomischen Arbeitsplatzverbesserung, indem er nach dem TOP-Prinzip (technisch, organisatorisch, persönlich) gelenk- und belastungsartspezifische Maßnahmen vorschlägt. Der Einsatz einer Bewegungstransformation erlaubt es, den Analyseaufwand zu minimieren: Die Aufnahme nur eines Mitarbeiters pro Arbeitsplatz reicht aus, um eine individuelle Arbeitsplatzbewertung für jeden Mitarbeiter zu erstellen, dessen Fähigkeitsprofil vorliegt.

Die Methode wurde in mehreren Evaluationen erprobt und lieferte valide Ergebnisse. Die Anwender konnten mithilfe der Analyseergebnisse ergonomisch kritische Arbeitsschritte identifizieren und Maßnahmen zur Arbeitsplatzverbesserung beschließen, die in der Zukunft umgesetzt werden sollen.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden daher vollständig erreicht.

2. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

2.1. Innovativer Beitrag

Das erzielte Ergebnis des Forschungsvorhabens ist ein neues Analyseverfahren, um die Ergonomie am Arbeitsplatz zu bewerten und ergonomische Maßnahmen zur Arbeitsgestaltung abzuleiten. Die neuartige Methodik hebt sich von bestehenden Verfahren darin ab, dass sie sowohl eine Fähigkeitsanalyse zur Erfassung der individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter als auch eine Anforderungsanalyse zur Erfassung der Anforderungen an den Mitarbeiter durch den Arbeitsplatz umfasst. Die gemeinsame Analyse von Fähigkeiten und Anforderungen erlaubt es nicht nur, die allgemeine Belastung zu erheben, sondern auch die individuelle Beanspruchung der Mitarbeiter abzuschätzen. Somit können die Analyseergebnisse dazu genutzt werden, auch individuelle Einschränkungen der Bewegungsfähigkeit und Krafftähigkeit in der ergonomischen Auslegung und Gestaltung von Arbeitsplätzen zu berücksichtigen.

Der Einsatz von Motion-Capture-Systemen zur ergonomischen Bewertung der Arbeitsplätze ist bereits Stand der Technik und bei unterschiedlichen Anbietern auf dem Markt verfügbar. Ein Einsatz dieser Technologie zur Fähigkeitsanalyse hat bisher jedoch nicht stattgefunden, obwohl es diese Technologie ermöglicht, mit geringem Aufwandaufwand Bewegungsdaten zu generieren und diese in die Auslegung von Arbeitsplätzen einzubeziehen. Die gezielte Transformation der Bewegungsabläufe ermöglicht es, für eine beliebige Mitarbeiteranthropometrie einen validen Bewegungsablauf zu erzeugen und die individuelle Beanspruchung zu ermitteln. Aufgrund der Transformation der Bewegungsabläufe muss lediglich ein Mitarbeiter im Arbeitsprozess aufgenommen werden, um eine individuelle Arbeitsplatzbewertung für beliebig viele Mitarbeiter zu erstellen. Voraussetzung hierzu ist lediglich, dass die Mitarbeiter zuvor die Fähigkeitsanalyse durchlaufen haben.

2.2. Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Der vorgesehene Einsatzzweck des Verfahrens ist die Analyse der Ergonomie von manuellen Arbeitsprozessen in Produktion und Logistik. Im Anschluss an die Analyse können Maßnahmen umgesetzt werden, die die Belastung auf den arbeitenden Menschen reduzieren. Eine ergonomische Gestaltung reduziert die Belastungen und Fehlzeiten am Arbeitsplatz. Gleichzeitig wird die Leistungsfähigkeit und Produktivität erhöht. Empfohlene Maßnahmen orientieren sich am TOP-Prinzip:

- Technisch: Beseitigung von Gefahrenquellen, Optimierung von baulichen und technischen Arbeitsbedingungen, Berücksichtigung von Umgebungsfaktoren.
- Organisatorisch: Sind keine technischen Maßnahmen möglich, sollen organisatorische Maßnahmen umgesetzt werden, z.B. Wechsel der Belastungsarten, Optimierung des Materialflusses, Veränderung des Arbeitsablaufs.
- Persönlich: Die Visualisierung der Analyse kann dazu genutzt werden, Mitarbeiter auf mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der Belastung hinzuweisen und im Einsatz vorhandener Hilfsmittel zu unterweisen, oder persönliche Schutzausrüstung bereit zu stellen.

Da für die Anwendung des Verfahrens lediglich Bewegungen, bewegte Gewichte und personenbezogene Daten aufgenommen werden müssen, ist ein Einsatz bei manuellen Arbeitsprozessen in beliebigen Branchen denkbar. Beispielhaft sind hier das Baugewerbe, das Handwerk oder auch die Pflege zu nennen.

2.3. Weiterentwicklung

Die Evaluationen bei den Industriepartnern des Forschungsprojektes haben gezeigt, dass die Methode funktioniert und valide Ergebnisse liefert. Mithilfe der Analyseergebnisse konnten ergonomisch kritische Arbeitsplätze und -schritte erkannt werden und Abstellmaßnahmen nach dem TOP-Prinzip beschlossen werden. Allerdings deckt das entwickelte Verfahren nicht alle Belastungsarten manueller Arbeitsprozesse ab. Es ist möglich, die Belastung beim manuellen Heben, Halten und

Tragen von Lasten und bei Körperbewegungen und -zwangshaltungen zu bewerten. Eine Bewertung von Belastungen beim Ziehen und Schieben von Lasten, bei Kraftausübung im Finger-Handbereich, bei Körperfortbewegung und bei der Ausübung von Ganzkörperkräften gemäß den Leitmerkmalmethoden ist nicht möglich. Um Arbeitsprozesse ganzheitlich zu bewerten, müsste das Verfahren um eine Bewertung dieser Belastungsarten ergänzt werden. Dies erfordert jedoch einen höheren Datenbedarf, was zu einem deutlich höheren Analyseaufwand führen würde.

Ein weiterer Punkt ist die Bewegungstransformation. Die hierzu verwendete inverse Kinematik ermittelt zwar für die meisten Bewegungen valide Gelenkpositionen, jedoch stoßen die verwendeten Algorithmen bei komplexen Bewegungen und stark unterschiedlichen Körpergrößen an ihre Grenzen. Für eine Weiterentwicklung wäre es dafür sinnvoll, auf eine kommerzielle Lösung für die Berechnung der inversen Kinematik zurückzugreifen.

Für den industriellen Einsatz muss zudem der entwickelte Softwareprototyp zu einer anwendungsfreundlichen und leistungsfähigen Software weiterentwickelt werden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ziel des Projekts war es, eine grundlegend neue Form der Ergonomieanalyse zu entwickeln, die die individuelle Belastbarkeit und Bewegungsfähigkeit der Mitarbeiter erfasst und die Anforderungen der Arbeitsplätze an die Belastbarkeit und Bewegungsfähigkeit für jeden Mitarbeiter individuell berechnet, die Anforderungen und die Fähigkeiten miteinander abgleicht und dabei die muskuloskelettalen Belastungen für die einzelnen Mitarbeiter berechnet.

Dieses Kapitel erläutert zunächst, welche Arbeiten im Zeitraum des Vorhabens in den einzelnen Arbeitspaketen durchgeführt wurden und zu welchen Ergebnissen sie geführt haben. Anschließend wird in Kapitel 0 die entwickelte Methodik als Gesamtergebnis der Arbeitspakete vorgestellt.

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde im Laufe des Projekts ein Technologiewechsel vorgenommen, von der Tiefenkamera hin zu einem Motion-Tracking-Anzug. Die durchgeführten Arbeiten zu Beginn der Projektlaufzeit sind uneingeschränkt auf die Bewegungserfassung mit dem Motion-Tracking-Anzug übertragbar, mit dem Vorteil, dass die Bewegungen der untersuchten Probanden mit deutlich höherer Genauigkeit erfasst werden können.

3.1. AP 1 Definition der Bewegungsübungen zur Fähigkeitsanalyse der Mitarbeiter

Zusammenfassung

Im ersten Arbeitspaket wurden unterschiedliche Bewegungsübungen zur Fähigkeitsanalyse entwickelt. Die Übungen wurden so gestaltet, dass sie die Anforderungen an Mitarbeiter aus der Produktion und Logistik testen können.

Ziel

Ziel des ersten Arbeitspaketes war die Entwicklung von Bewegungsübungen, die es erlauben, die Beweglichkeit und die Belastbarkeit von Mitarbeitern zu analysieren, welche diese Übungen durchführen. Diese Übungen waren dabei zum einen auf die Anforderungen abzustimmen, die typischerweise in der Produktion und Logistik von KMU auftreten. Zum anderen waren sie so zu gestalten, dass sie mithilfe von 3D-Kameras oder von weiteren Sensoren mit ausreichender Genauigkeit erfasst und analysiert werden können.

Durchgeführte Arbeiten

Die Arbeiten an der Definition der Bewegungsübungen gliederten sich in drei Punkte:

Bestimmung typischer Bewegungsabläufe und Anforderungen

Zu Beginn des Projekts wurden basierend auf einer Literaturrecherche besonders häufig auftretende Krankheitsbilder von Mitarbeitern in der Produktion und Logistik herausgearbeitet. In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden Arbeitsplatzanalysen diskutiert, abgestimmt und durchgeführt. Vor-Ort-Begehungen zur Besichtigung, Beurteilung und Bewertung der Arbeitsprozesse fanden in vier Unternehmen des projektbegleitenden Ausschuss statt. Zudem wurde ein Erfahrungsaustausch mit Ergotherapeuten der BG Unfallklinik Murnau (BGU) durchgeführt.

Gestaltung der einzelnen Bewegungsübungen

Die Definition der Bewegungsübungen erfolgte im Labor für Bewegungsanalyse der BGU. Die Auswahl der Bewegungsübungen legte ihre Schwerpunkte auf die Ergebnisse von AP 1.1 der besonders belasteten Körperstrukturen.

Evaluierung und Auswahl der Bewegungsübungen

Die Evaluierung und Auswahl der Bewegungsübungen erfolgte interdisziplinär. Zur Überprüfung der Erfassbarkeit wurden die Bewegungsübungen mit der 3D-Kamera gefilmt und mit dem Motion-Tracking-Anzug aufgenommen. Mit mehreren Probanden wurde der gesamte Ablauf der Bewegungsübungen auf Einfachheit, Reproduzierbarkeit und Dauer der Übungen überprüft.

Erzielte Ergebnisse

Bestimmung typischer Bewegungsabläufe und Anforderungen

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigten, dass insbesondere der untere Rücken, der Nacken, die Schultern und die Unterarme von muskuloskelettalen Beschwerden betroffen sind. Mithilfe der untersuchten Arbeitsplätze wurden Arbeitsprozesse und -tätigkeiten identifiziert, die aufgrund der Wiederholungen oder Belastungen besonders gefährdend für die Gesunderhaltung der Mitarbeiter sind. Als Ergebnis liegen unter anderem die Arbeitsplatzbesichtigung, -beurteilung und -bewertung vor. Entsprechend der Ergebnisse wurden Bewegungsübungen definiert, die sich aus den Erfahrungen der Literaturrecherche, Arbeitsplatzanalyse und dem Austausch mit der ergotherapeutischen Abteilung der BGU ergeben haben.

Gestaltung der einzelnen Bewegungsübungen

Die Bewegungsübungen liegen vor und beschreiben Bewegungsausführungen in den 3 Ebenen, z.B. Bewegungsübungen zum Testen der Range of Motion (Bewegungsumfang) der Schulter (s. Abbildung 2).

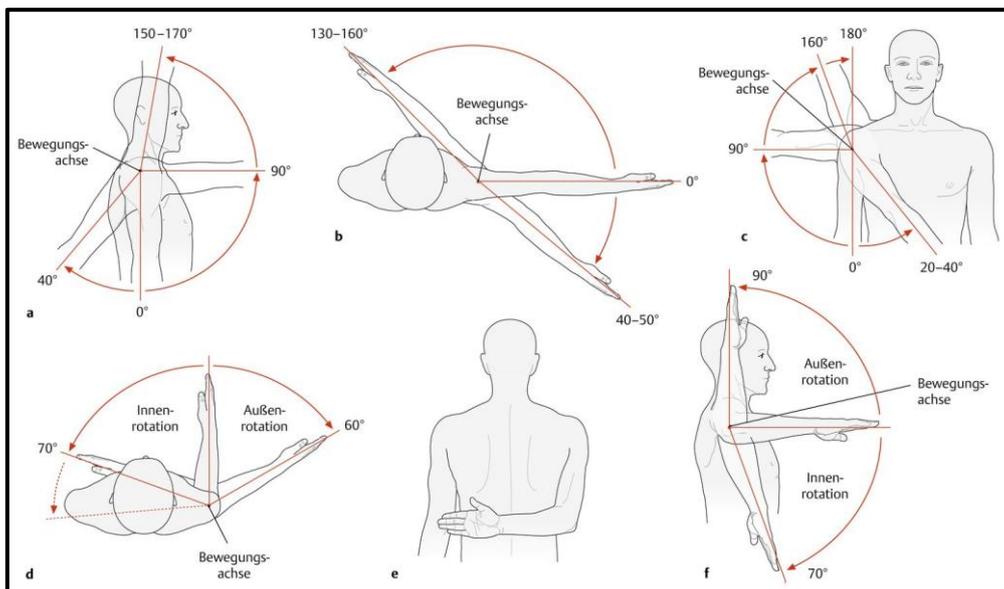


Abbildung 2: Bewegungsumfang der Schulter hinsichtlich Flexion und Extension, Adduktion und Abduktion sowie Innen- und Außenrotation (nach Schünke et al., 2014)

Evaluierung und Auswahl der Bewegungsübungen

Die Evaluierung konnte zeigen, dass die Bewegungsübungen valide und wiederholbar sind. Die Einfachheit der Standardbewegungen ist gegeben. Die Bewegungsumfänge können mit dem Motion-Tracking-Anzug detailliert erfasst werden. Die Vorbereitungsdauer für die Erfassung der Bewegungsübungen mit dem Motion-Tracking-Anzug ist gegenüber der 3D-Kamera im Nachteil, dauert aber dennoch nur ca. 15 Minuten (Vermessen des Körpers, Anbringen der Sensoren und Kalibrierung). Der Zugewinn an Genauigkeit überwiegt dem kleinen zeitlichen Nachteil.

3.2. AP 2 Datenerfassung und -aufbereitung

Zusammenfassung

Im zweiten Arbeitspaket wurden die ausgearbeiteten Bewegungsübungen von Probanden ausgeführt und im ersten Durchlauf mit einer 3D-Kamera analysiert. Aufgrund der ungenauen Datenerfassung wurde ein Technologiewechsel vorgenommen. Die Verwendung des Motion-Tracking-Anzugs

zur Aufnahme der Bewegungsübungen hat zu validen Ergebnissen mit deutlich höherer Genauigkeit geführt.

Arbeitspaket 2 hatte das Ziel, die Datenerfassung und -aufbereitung für das Forschungsvorhaben zu entwickeln und zu evaluieren. Dies betrifft zum einen die Bewegungsübungen für die Mitarbeiter und zum anderen die Arbeitsabläufe an den Arbeitsplätzen im Unternehmen. Die Ergebnisse der Datenaufbereitung sind so zur Verfügung zu stellen, dass sie von den Algorithmen zur Fähigkeitsanalyse (AP 3) und zur Anforderungsanalyse (AP 4) gleichermaßen verwendet werden können.

Durchgeführte Arbeiten

Die Arbeiten an der Datenerfassung und -aufbereitung gliederten sich in drei Punkte.

Bewegungserkennung und Messung von Bewegungsmerkmalen

Es wurde eine Software entwickelt, die die Bewegungen eines Probanden mithilfe einer 3D-Kamera aufzeichnen kann. Das von der Kamera aufgenommene Tiefenbild wird mit der Middleware NuiTrack ausgewertet, um die Position und Orientierung von 19 Gelenkpunkten zu approximieren.

Die Erfassung der Bewegung der Probanden mit dem Motion-Tracking-Anzug und die Aufbereitung der Bewegungsdaten werden softwareseitig mittels der dazugehörigen Software *MVN Analyze Pro* gelöst. Es wurde eine Software entwickelt, in die die kinematischen Daten importiert werden, um die Bewegungsmerkmale zu bestimmen.

Erfassung von Metadaten

Um die bewegten Gewichte am Arbeitsplatz aufzuzeichnen und mit den Bewegungen zu verknüpfen, wurde eine neue Methode in der am IPMT entwickelten Web-App *CheckIT* implementiert. Außerdem wurde eine manuelle Eingabe und/oder Korrektur der Metadaten mittels Bedienelementen in der Software implementiert.

Evaluierung der Datenerfassung, -aufbereitung und Dokumentation

Es wurde die Datenerfassung für die Fähigkeits- sowie die Arbeitsplatzanalyse evaluiert. Hierzu wurden die erwarteten Bedingungen am IPMT nachgestellt und systematisch evaluiert. Anhand einer Beispielübung wurde die Machbarkeit der Fähigkeitsanalyse untersucht. Die Ergebnisse wurden auf der Conference on Production Systems and Logistics veröffentlicht.

Erzielte Ergebnisse

Bewegungserkennung und Messung von Bewegungsmerkmalen

Die Software kann die unterschiedlichen Gelenkpunkte erfassen und die notwendigen Winkel berechnen. Zur Überprüfung der ermittelten Gelenkpositionen überlagert das Programm das RGB-Bild mit dem ermittelten Skelett. Mithilfe der Screenshots kann der Nutzer erkennen, ob bei den maximalen Gelenkwinkeln die Erfassung korrekt war und bei Bedarf einzelne Aufnahmen herausfiltern. Auf eine Separierung der Übungswiederholungen über Haltepunkte wurde zunächst verzichtet, da erste Tests ergeben haben, dass bei einer fehlerhaften Erfassung einzelne Übungen wiederholt werden müssen.

In Bezug auf die Bewegungserfassung mit dem Motion-Tracking-Anzug wurden keine größeren Probleme festgestellt. Auch mussten bei gelungener Kalibrierung nahezu keine Bewegungen wiederholt aufgenommen werden, da bereits im ersten Durchgang fehlerfreie Aufnahmen möglich waren.

Erfassung von Metadaten

Mithilfe der Web App lassen sich die bewegten Gewichte und die Dauer der Handhabung erfassen und über den Zeitstempel in der Ergonomiesoftware mit dem Bewegungsablauf koppeln.

Evaluierung der Datenerfassung, -aufbereitung und Dokumentation

Die Untersuchung hat gezeigt, dass 3D-Kameras Schwächen in für die Analyse notwendigen Situationen haben, wie z.B. bei der Aufnahme von großen Arbeitsplätzen oder von Personen, die seitlich

oder mit dem Rücken zur Kamera stehen. Für eine sinnvolle Ergonomieanalyse wurde entschieden, einen Motion-Tracking-Anzug zu beschaffen, der für die Arbeitsplatzanalyse verwendet wird.

Die Evaluierung der Fähigkeitsanalyse hat außerdem aufgezeigt, dass bei mehreren Übungen ungenaue Gelenkpositionen bei stärkerer Krümmung der Wirbelsäule oder der Handgelenke berechnet werden und eine korrekte Berechnung von Gelenkwinkeln daher nicht möglich ist. Solange eine genaue Erfassung der Übungen mit den bestehenden Tracking-Algorithmen nicht möglich ist, wird die Fähigkeitsanalyse mit dem Motion-Tracking-Anzug durchgeführt, um die Analysemethodik zu validieren.

3.3. AP 3 Entwicklung der generischen Fähigkeitsanalyse

Zusammenfassung

Es wurde eine generische Fähigkeitsanalyse entwickelt, mit der die Bewegungsfähigkeit mittels des Motion-Tracking-Anzugs valide erhoben werden kann. Eine schnelle Aussage zur Belastbarkeit der Mitarbeiter kann über die einfache Messung der Handgriffkraft getroffen werden, da diese einen Zusammenhang mit dem individuellen Muskelstatus (abhängig von Alter, Körpergröße und Körpergewicht) zeigt.

Ziel

Ziel von Arbeitspaket drei war es, aus den Bewegungsübungen automatisiert und zuverlässig die Bewegungsfähigkeit und die Belastbarkeit der Mitarbeiter bestimmen zu können.

Durchgeführte Arbeiten

Anforderungsgerechte Anleitung der Bewegungsübungen

Die geforderte Bewegung ist bis zum individuellen Bewegungsmaximum durchzuführen. Die Bewegungen werden durch den Versuchsleiter angeleitet. Bereits entworfen sind Zeichnungen/Schaubilder und Formulierungen der Zielbewegung, um eine möglichst gleichbleibende Bewegungsausführung über die verschiedenen Mitarbeiter hinweg zu gewährleisten. Normwerte für die Range of Motion wurden für die Standardbewegungsübungen herausgearbeitet.

Analyse und Bewertung des Bewegungsablaufs

Erarbeitung einer Methode zur Erfassung und Bewertung der Gelenkwinkelverläufe aus den getätigten Aufnahmen mit dem Motion-Tracking-Anzug.

Darstellung der Fähigkeiten des einzelnen Mitarbeiters

Es wurde eine Literaturrecherche zu den erwarteten mittleren Fähigkeiten für die arbeitende Belegschaft durchgeführt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Beweglichkeit der zu untersuchenden Gelenke sowie der Handgriffkraft als Indikator für die Belastbarkeit gelegt. Weiterhin wurden geeignete Darstellungsformen gesucht und erstellt, um die individuelle Beweglichkeit einzuordnen.

Evaluierung der generischen Fähigkeitsanalyse

Die Fähigkeitsanalyse wurde mit Testpersonen der beteiligten Institute durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Dauer der Vor- und Nachbereitung als auch der zeitliche Aufwand für die zu untersuchende Person in der Fähigkeitsanalyse berücksichtigt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der Fähigkeitsanalyse mit den Testpersonen besprochen und eine Einordnung der individuellen Ergebnisse anhand der Vergleichswerte vorgenommen.

Erzielte Ergebnisse

Anforderungsgerechte Anleitung der Bewegungsübungen

Mithilfe der Anleitung ist es den untersuchten Personen möglich, die Bewegungsübungen korrekt durchzuführen. Kleinere Unterschiede der Bewegungsausführung zwischen den Personen sind vorhanden, da der Mensch individuell betrachtet werden muss und etwaige Einschränkungen der Per-

sonen nicht ausgeschlossen werden können. Genau diese Einschränkungen gilt es bekanntlich zu identifizieren. Bewegungsumfänge der untersuchten Personen können anhand der Normwerte verifiziert werden.

Analyse und Bewertung des Bewegungsablaufs

Der Bewegungsablauf kann analysiert und bewertet werden. Ein Algorithmus berechnet die Gelenkwinkel und bestimmt die maximalen Bewegungsumfänge für jede Bewegungsübung. Um die Bewegungsumfänge zu bewerten, werden die Ergebnisse mit den Normwerten verglichen.

Darstellung der Fähigkeiten des einzelnen Mitarbeiters

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass die Handgriffkraft ein Indikator für die individuelle Belastbarkeit sein kann. Es zeigen sich Korrelationen der Handgriffkraft mit dem Gesundheitsstatus und der Gesamtmuskelkraft. Zudem kann aufgrund der Literaturrecherche die individuelle Handgriffkraft anhand von Geschlecht, Alter, Körpergröße und Körpergewicht eingeordnet werden. Es zeigte sich, dass die Testung der Handgriffkraft ein geeignetes Mittel ist, um den muskulären Status individueller Mitarbeiter zu erheben und einordnen zu können. Für die Darstellung der Beweglichkeit wird ein Ampelsystem verwendet, das auf Vergleichsdaten einer Grundgesamtheit basiert. In diesem Ampelsystem werden Gelenke gelb markiert, wenn der gemessene Bewegungsumfang unter der unteren Normgrenze liegt.

Evaluierung der generischen Fähigkeitsanalyse

Die Dauer für die Vor- und Nachbereitung der Fähigkeitsanalyse ist als sehr gering einzuschätzen, vor allem in der Gesamtdauer der Fähigkeitsanalyse bei Durchführung mit der Tiefenkamera. Gegenüber dem Motion-Tracking-Anzug ist die Tiefenkamera hinsichtlich der Validität der Messergebnisse allerdings deutlich im Nachteil. Insbesondere Übungen, bei denen die Arme oder Beine durch andere Körperteile verdeckt werden oder bei denen einzelne Körperteile dicht beieinanderliegen, konnten nur unzuverlässig erfasst werden. Aus diesem Grund wird bei der Durchführung der Fähigkeitsanalyse auf den Motion-Tracking-Anzug zurückgegriffen. Die Dauer zum Ausführen der Aufgaben der Fähigkeitsanalyse ist bei den Systemen identisch, jedoch sind beim Motion-Tracking-Anzug 15 Minuten Vorbereitungszeit notwendig. Die Analyse mit dem Motion-Tracking-Anzug ist in Summe gegenüber der Tiefenkamera dennoch im Vorteil, da alle Übungen aufgenommen werden können und valide Bewegungsumfänge berechnet werden.

Die Testpersonen beschrieben die Anzahl der Aufgaben als auch den zeitlichen Aufwand für die Fähigkeitsanalyse als sehr gut. Zudem ist die Einordnung der individuellen Fähigkeiten mit Hilfe eines Ampelsystems einfach zu verstehen und zu bewerten. Es ist von einer hohen Akzeptanz der Methode auszugehen.

3.4. AP 4 Generische Anforderungsanalyse

Zusammenfassung

Die Bewegungen von Mitarbeitern bei der Ausführung ihrer Arbeitstätigkeiten werden automatisch erfasst und mit den zu bewegenden Gewichten gekoppelt. Des Weiteren können die Anforderungen des Arbeitsplatzes an den Mitarbeiter hinsichtlich Beweglichkeit und Belastbarkeit dargestellt werden.

Ziel

Ziel des vierten Arbeitspaketes war es, die Anforderungen der Arbeitsplätze eines Unternehmens an die Beweglichkeit und Belastbarkeit der Mitarbeiter automatisiert zu erfassen.

Durchgeführte Arbeiten

Erfassung der Bewegungen und Haltepunkte typischer Bewegungsabläufe

Die Bewegungen werden mithilfe des Motion-Tracking-Anzugs erfasst und für die weitere Analyse werden sowohl die Bewegungsdaten (Position, Rotation und Geschwindigkeit der Gelenke) als

auch die Animation der Bewegung verwendet. Da die Prozesse sehr individuell sind und sich die Materialpositionen und Arbeitsplätze unterscheiden, werden nicht die Haltepunkte, sondern ergonomisch relevante Bewegungen ermittelt. Hierzu wurden unterschiedliche Ansätze entwickelt, um die Daten zu filtern, wie z.B. durch die Definition eines normalen Arbeitsbereichs oder neutraler Körperhaltungen.

Transformation der Bewegungsabläufe

Für die Transformation der Bewegungsabläufe wurden drei unterschiedliche Ansätze untersucht. Neben einem Ansatz zum Erstellen generischer Bewegungsabläufe wurden die punktuelle Transformation der Bewegungsabläufe und die analytische Ermittlung von Gelenkwinkeln untersucht.

Interpolation der Bewegungsabläufe

In einer Versuchsreihe mit 23 Personen wurden Greifversuche mit unterschiedlichen Ausgangspositionen durchgeführt und die Auswirkung der Anthropometrie auf den Bewegungsablauf untersucht.

Berechnung von Bewegungsmerkmalen

Neben den Gelenkwinkeln aus den Bewegungsübungen werden zusätzliche Gelenkwinkel für das Rapid Upper Limb Assessment (RULA) berechnet.

Berechnung der muskuloskelettalen Belastungen

Die Berechnung der muskuloskelettalen Belastung wurde für die Schultergelenke sowie dem Moment an der unteren Wirbelsäule (L5/S1-Moment) im Programm implementiert. Außerdem wird die Bandscheibenkompressionskraft an der unteren Wirbelsäule berechnet.

Darstellungen für die Bewegungs- und Belastungsanforderungen

Es wurde untersucht, ob eine Darstellung für die Bewegungs- und Belastungsanforderungen, die für alle Mitarbeiter gilt, möglich und sinnvoll ist.

Evaluierung der generischen Anforderungsanalyse

Die generische Anforderungsanalyse wurde mit Beispieldaten aus der IPMT-Modellfabrik überprüft.

Erzielte Ergebnisse

Erfassung der Bewegungen und Haltepunkte typischer Bewegungsabläufe

Die Bewegungen können auch vor Ort erfasst werden und es ist dank der hohen Sensorreichweite problemlos möglich, größere Bereiche aufzunehmen. Ergonomisch kritische Stellen können automatisiert extrahiert werden.

Transformation der Bewegungsabläufe

Die punktuelle Transformation der Bewegungsabläufe hat sich als vielversprechender Ansatz herausgestellt. Hierbei wird die Animation des Arbeitsablaufs im ersten Schritt auf ein Menschmodell der jeweiligen Mitarbeitergröße übertragen, d.h. das Menschmodell führt die gleiche Bewegung aus, erreicht jedoch nicht die gleichen absoluten Positionen. Der Arbeitsplatz gibt jedoch die Handpositionen und -rotationen und das Blickziel beim Arbeiten vor. Um diese Ziele auch bei anderen Körpergrößen zu erreichen, werden die Bewegungen im zweiten Schritt mit einer inversen Kinematik verändert und die Animation überschrieben. Weil nicht alle Bewegungen durch den Arbeitsplatz vorgegeben sind, werden neutrale Handpositionen und Transportbewegungen mit einem Algorithmus erkannt und von der Transformation ausgeschlossen.

Interpolation der Bewegungsabläufe

Die Versuche haben gezeigt, dass selbst ein einfacher Bewegungsablauf sehr unterschiedlich ausgeführt wird. Aufgrund der vielen Freiheitsgrade variieren die Gelenkwinkel zwischen zwei Personen ähnlicher Körpermaße und zwischen zwei Versuchsdurchläufen derselben Person z.T. sehr stark, trotz gleicher Arbeitsaufgabe. Vor diesem Hintergrund wurde der Ansatz der Interpolation der Bewegungsabläufe verworfen.

Berechnung von Bewegungsmerkmalen

Über den gesamten Bewegungsablauf können die Gelenkwinkel bestimmt werden. Falls notwendig, können ebenfalls die Zeitanteile für bestimmte Gelenkwinkelbereiche berechnet werden.

Berechnung der muskuloskelettalen Belastungen

Es zeigte sich, dass eine Analyse mit einer zusätzlichen Software aufgrund der erforderlichen Schnittstellen nicht förderlich ist, um ein schlankes und einfaches Gesamtkonzept zu entwickeln. Als Indikator für die muskuloskelettale Belastung werden die Gelenkmomente berechnet. Zur ergonomischen Bewertung der Arbeitstätigkeit werden eine leicht vereinfachte Version des RULA (inkl. Berücksichtigung externer Lasten), die Einordnung der Gelenkwinkel anhand der individuellen Beweglichkeit, die Momente der Schultern und des L5/S1-Gelenks sowie die Berechnung der Bandscheibenkompressionskraft an L5/S1 vorgeschlagen. Die Gelenkmomente werden mittels der Gelenkinematik und der externen Last bestimmt. Sowohl die Gelenkinematik als auch die Gelenkmomente können anhand des bereits bekannten Ampelsystems individuell bewertet werden und geben Aufschluss über die individuelle Beanspruchung (Abbildung 3). Neben der Berechnung der Gelenkmoment ist eine Berechnung der Bandscheibenkompressionskraft an der unteren Wirbelsäule in der Software implementiert.

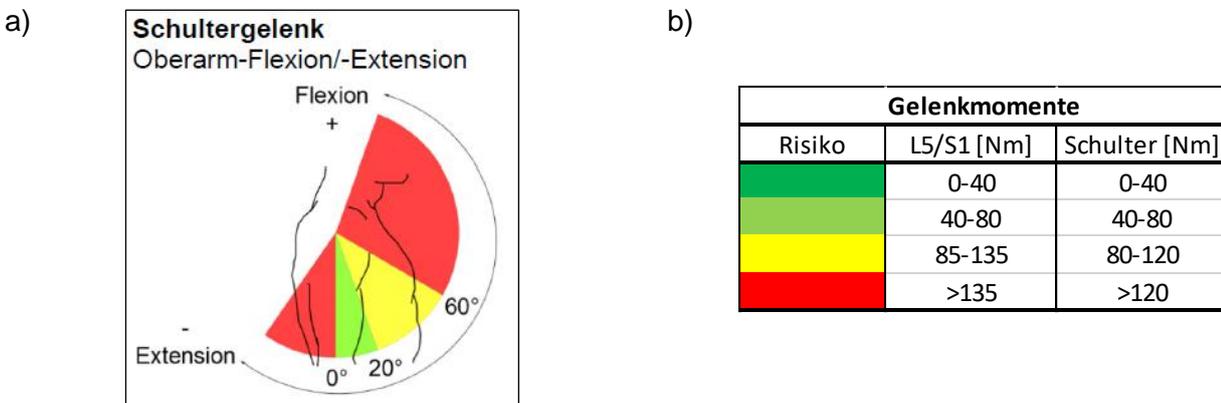


Abbildung 3 : a) Bewertung der Schultergelenkflexion für manuelle Tätigkeiten ohne Berücksichtigung der Parameter wie Dauer, Häufigkeit und Dynamik der Bewegungsausführung (in Anlehnung an DIN EN 1005-4). b) Belastungsanalyse und Einordnung selbiger nach Grenzwerten in Anlehnung an das Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) (nach IFA, 2015).

Darstellungen für die Bewegungs- und Belastungsanforderungen

Wegen der starken Abhängigkeit der auftretenden Belastungen werden die Belastungen immer in Bezug zur erfassten individuellen Fähigkeit dargestellt (vgl. Abschnitt 5.5.5).

Evaluierung der generischen Anforderungsanalyse

Die Versuche haben gezeigt, dass die entwickelte Analyse für alle drei Belastungsarten valide Ergebnisse liefert.

3.5. AP 5 Fähigkeits- und Anforderungsabgleich

Zusammenfassung

Im fünften Arbeitspaket wurde ein Verfahren zum Abgleich der Anforderungen mit den individuellen Fähigkeiten entwickelt und für unterschiedliche Perspektiven visualisiert.

Ziel

Ziel des fünften Arbeitspakets war es, einen Fähigkeits- und Anforderungsabgleich für einzelne Mitarbeiter und Arbeitsplätze sowie für die Gesamtheit der Belegschaft und Arbeitsplätze zu entwickeln. Der Schwerpunkt des Arbeitspakets liegt darauf, geeignete Darstellungen zu entwickeln, die

es dem Anwender ermöglichen, die Passung von Mitarbeitern und Arbeitsplätzen schnell zu beurteilen.

Durchgeführte Arbeiten

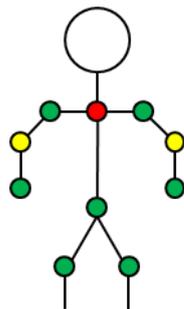
Anhand der entwickelten Fähigkeits- und Anforderungsanalyse wurde in diesem Arbeitspaket ein Konzept zum Abgleich der Mitarbeiterfähigkeiten und der Arbeitsplatzanforderungen erarbeitet. Für die Bewertung wurde auf Vorarbeiten des Länderausschusses für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI), der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) zurückgegriffen. Hierbei wurden vier verschiedene Perspektiven berücksichtigt.

Erzielte Ergebnisse

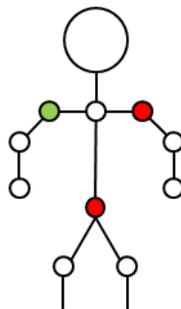
Perspektive 1 – Fähigkeits-Anforderungsabgleich für einen Mitarbeiter und einen Arbeitsplatz

Beim Abgleich der Beweglichkeit mit den auftretenden Gelenkwinkeln handelt es sich um eine zeitliche Betrachtung. Für jedes Gelenk sind unterschiedliche Zeitanteile über 50 % der Beweglichkeit definiert, die zu einer Risikobewertung der einzelnen Gelenke führt, s. Abbildung 4 a). Die Darstellungen der Belastung und statischen Haltungen zeigen die höchsten auftretenden Belastungen eines Arbeitsprozesses auf, s. Abbildung 4 b) und c). Eine ausführliche Erklärung der Arbeitsplatzbeurteilung ist in Abschnitt 5.5.5 zu finden.

a) Beweglichkeit:



b) Belastung:



c) Statische Haltungen:

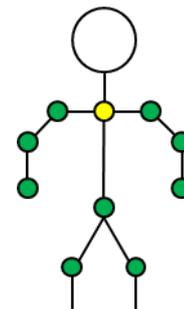


Abbildung 4: Darstellungen zum Fähigkeits-Anforderungsabgleich für einen Mitarbeiter und einen Arbeitsplatz

Perspektive 2 – Fähigkeits-Anforderungsabgleich für einen Mitarbeiter und mehrere Arbeitsplätze

In Abbildung 5 werden die Risikobewertungen der Gelenke für jede Belastungsart eines Mitarbeiters bei allen Arbeitsplätzen visualisiert. Je mehr Felder bei einem Arbeitsplatz grün markiert sind, desto weniger wird der Mitarbeiter belastet.

	HWS	Schulter				Ellenbogen		Handgelenk		BWS/LWS			Kniegelenk		HWS: Halswirbelsäule BWS/ LWS: Brust- und Lendenwirbelsäule GBW: Gelenkbeweglichkeit GM: Gelenkmoment KKWS: Wirbelsäulenkompressionskraft
	GBW	GBW		GM		GBW		GBW		GBW	GM	KKWS	GBW		
		L	R	L	R	L	R	L	R						
AP 1	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	
AP 2	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	
AP 3	Rot	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Rot	Rot	Grün	Grün	
AP 4	Rot	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Rot	Rot	Grün	Grün	
AP 5	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Rot	Rot	Grün	Grün	

Abbildung 5: Darstellung zum Fähigkeits-Anforderungsabgleich für einen Mitarbeiter und alle Arbeitsplätze

Perspektive 3 – Fähigkeits-Anforderungsabgleich für einen Arbeitsplatz und alle Mitarbeiter

In Abbildung 6 werden die Risikobewertungen der Gelenke für jede Belastungsart aller Mitarbeiter bei einem Arbeitsplatz dargestellt. Zusätzlich kann für die spätere Maßnahmenableitung festgehalten werden, ob eine allgemeine, eine individuelle oder keine Maßnahme nötig ist.

	HWS	Schulter				Ellenbogen		Handgelenk		BWS/LWS			Kniegelenk	
	GBW	GBW		GM		GBW		GBW		GBW	GM	KKWS	GBW	
		L	R	L	R	L	R	L	R				L	R
MA 1	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green
MA 2	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green
MA 3	Red	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green
MA 4	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green
MA 5	Yellow	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green
	↓	↓				↓	↓		↓			↓		
Anzahl	0	3	2	5	5	5	5	5	5	1	0	3	5	5
Anzahl	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-	0	0
Anzahl	2	0	2	0	0	0	0	0	0	4	5	2	0	0
A, I, K	A	I	A	K	K	K	K	K	K	A	A	I	K	K

HWS: Halswirbelsäule
 BWS/LWS: Brust- und Lendenwirbelsäule
 GBW: Gelenkbeweglichkeit
 GM: Gelenkmoment
 KKWS: Wirbelsäulenkompressionskraft
 A: Allgemeine Maßnahme
 I: Individuelle Maßnahme
 K: Keine Maßnahme

Abbildung 6: Darstellung zum Fähigkeits-Anforderungs-Abgleich für einen Arbeitsplatz und alle Mitarbeiter

Perspektive 4 – Fähigkeits-Anforderungsabgleich für alle Mitarbeiter und alle Arbeitsplätze

Für jeden Arbeitsplatz wird bewertet, für wie viele Mitarbeiter der Arbeitsplatz bei mindestens einem Teilschritt kritisch ist. Sortiert man die Arbeitsplätze nach dem Anteil der Mitarbeiter, für die der jeweilige Arbeitsplatz kritisch ist, erhält man eine Rangliste der kritischsten Arbeitsplätze. Diese Rangliste lässt sich, wie in Abbildung 7 dargestellt, visualisieren, um kritische Arbeitsplätze zu identifizieren und ergonomische Interventionen zu priorisieren. Die Rangliste kann analog für die einzelne Belastungsarten, einzelne Gelenke oder einzelne Gelenkwinkel erstellt und visualisiert werden, um prioritäre Ansatzpunkte für Gegenmaßnahmen zu finden.

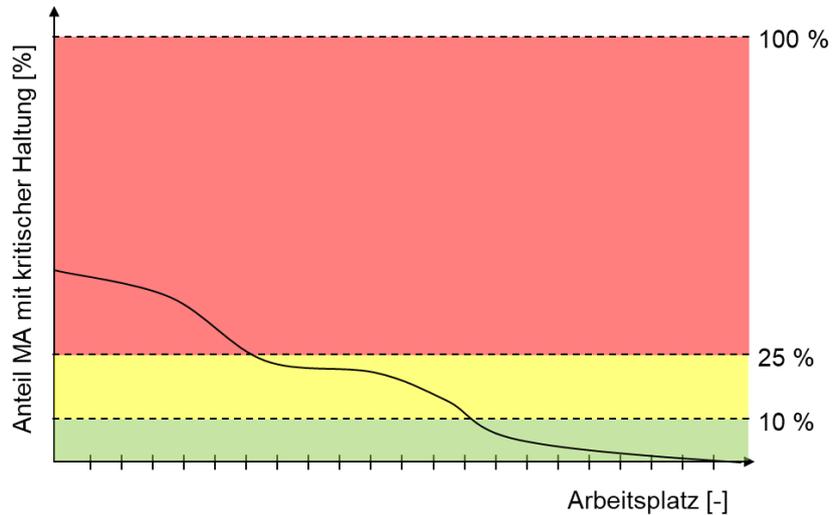


Abbildung 7: Darstellung zum Fähigkeits-Anforderungs-Abgleich für alle Mitarbeiter und alle Arbeitsplätze

3.6. AP 6 Vorgehen zur systematischen Maßnahmenableitung

Zusammenfassung

In Arbeitspaket sechs wurden Maßnahmenkataloge entwickelt, die den Anwender bei der Maßnahmenableitung unterstützen. Die Maßnahmenkataloge enthalten für jedes Gelenk und jede Belastungsart generische Verbesserungsmaßnahmen.

Ziel

Ziel des sechsten Arbeitspaketes war es, Maßnahmen zu erarbeiten um den Arbeitsplatz an die Fähigkeiten der Mitarbeiter anzupassen, zudem soll die individuelle Aufgabenzuordnung untersucht werden.

Durchgeführte Arbeiten

Klassifizierung von Arbeitsplätzen

Aufbauend auf der ergonomischen Bewertung der Belastung einzelner Mitarbeiter wurde ein Konzept zur Klassifizierung der Arbeitsplätze erstellt. Aus der Klassifizierung sollte hervorgehen, ob allgemeine oder individuelle Maßnahmen notwendig sind.

Ableitung von Maßnahmen für die verschiedenen Klassen von Arbeitsplätzen

Für die Maßnahmenableitung wurden die Einflussfaktoren auf die Mitarbeiterbelastung bei typischen Montage- und Logistikarbeitsplätzen ermittelt und in technische, organisatorische und persönliche Einflüsse unterteilt. Anschließend wurden aus den Einflussfaktoren mögliche Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet.

Individuelle Aufgabenzuordnung und Arbeitsplatzanpassung

Es wurde untersucht, wie sich die Arbeitsplatzbewertungen dazu nutzen lassen können, die Arbeitsaufgaben den einzelnen Mitarbeitern zuzuordnen. Hierbei war insbesondere darauf zu achten, eine Überbelastung aller Mitarbeiter zu vermeiden.

Evaluierung der systematischen Maßnahmenableitung

Die Maßnahmenableitung wurde mithilfe von Daten überprüft, die zu einem früheren Zeitpunkt im Projekt aufgenommen wurden.

Erzielte Ergebnisse

Klassifizierung von Arbeitsplätzen

Die Arbeitsplätze können mithilfe von Abbildung 6 klassifiziert werden. Sie hilft dem Anwender bei der Entscheidung, ob individuelle oder allgemeine Maßnahmen zur Ergonomieverbesserung notwendig sind. Ab welchem Anteil eine allgemeine Maßnahme nötig ist, ist individuell vom Unternehmen festzulegen, da diese Entscheidung stark von der Belegschaft und der Stichproben-größe abhängt. Ist die Belegschaft beispielsweise sehr heterogen mit stark unterschiedlichen Körpergrößen, würde eine allgemeine Maßnahme möglicherweise bei großen Mitarbeitern zu einer Entlastung führen und bei kleinen Mitarbeitern zu einer zusätzlichen Belastung und umgekehrt.

Ableitung von Maßnahmen für die verschiedenen Klassen von Arbeitsplätzen

Für jedes Gelenk wurde für jede Belastungsart ein generischer Maßnahmenkatalog erstellt. Sie sind sowohl für individuelle als auch für allgemeine Maßnahmen gültig. Es werden zunächst technische, dann organisatorische und zuletzt persönliche Maßnahmen zur Verbesserung der Ergonomie gesucht. Tabelle 1 in Abschnitt 5.6.1 zeigt beispielhaft den Maßnahmenkatalog für die Schulter zur Verminderung der Belastung durch hohe Gelenkwinkel.

Individuelle Aufgabenzuordnung und Arbeitsplatzanpassung

Die Arbeitsplätze können anhand der Darstellung zum Fähigkeits-Anforderungs-Abgleichs für einen Mitarbeiter und alle Arbeitsplätze (Abbildung 5) zugeordnet werden. Um dauerhaft beschwerdefrei an einem Arbeitsplatz arbeiten zu können, sollte keine Belastung im roten Bereich sein.

Evaluierung der systematischen Maßnahmenableitung

Die Maßnahmenkataloge haben es ermöglicht, für jeden kritischen Arbeitsschritt bei den bisher aufgenommenen Prozessen eine plausible Maßnahme zur Reduzierung der Belastung abzuleiten.

3.7. AP 7 Evaluation des Gesamtsystems

Zusammenfassung

Die Evaluation des Gesamtsystems hat gezeigt, dass sich das entwickelte Verfahren sehr gut dazu eignet, die Ergonomie von Arbeitsprozessen zu analysieren und geeignete Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten.

Ziel

Ziel des siebten Arbeitspaketes war es, die komplette Analyse in mindestens zwei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses durchzuführen und zu testen.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Evaluation des Gesamtsystems wurden 13 Personen und sechs Arbeitsplätze aus zwei Unternehmen analysiert. Hierzu wurden Fähigkeitsprofile für die Personen erstellt und die Arbeitsplatzanforderungen aufgenommen. Mithilfe der Bewegungstransformation wurden individuelle Bewertungen der Arbeitsplatzergonomie für die Mitarbeiter des entsprechenden Unternehmens erstellt. Es wurden die Arbeitsplatzanforderungen von je drei Arbeitsplätzen an fünf bzw. acht Mitarbeiter bestimmt. Die Arbeitsplatzaufnahmen wurden z. T. mit unterschiedlichen Mitarbeitern und Arbeitsaufträgen durchgeführt, um ein umfassendes Bild der Arbeitsbelastung zu gewinnen. Anhand der individuellen Beanspruchung wurden anschließend Maßnahmen zur Verbesserung der Ergonomie besprochen.

Erzielte Ergebnisse

Es konnte die individuelle Beanspruchung für die jeweiligen Mitarbeiter in den drei Dimensionen *Belastung*, *Beweglichkeit* und *statische Haltung* bestimmt werden. Hierbei wurden valide individuelle Bewegungsabläufe generiert und die Auswertung hat gezeigt, dass sich die Beanspruchung der jeweiligen Mitarbeiter bei einzelnen Arbeitsschritten z. T. stark unterscheidet: Während die körperferne Handhabung hoher Lasten bei allen Mitarbeitern zu kritischen Belastungen führt, konnten unterschiedliche Arbeitsschritte identifiziert werden, die nur bei Personen mit Einschränkungen in der Bewegungs- und/oder Belastungsfähigkeit zu einer Überbelastung geführt haben. Stark abweichende Körpermaße oder ein hohes Körpergewicht haben ebenfalls zur Folge, dass einzelne Mitarbeiter an einem Arbeitsplatz vermehrt beansprucht werden. Die Analyseergebnisse konnten mithilfe der systematischen Maßnahmenableitung dazu genutzt werden, für alle kritischen Arbeitsschritte Abstellmaßnahmen nach dem TOP-Prinzip zu finden, die in naher Zukunft umgesetzt werden sollen. Hierbei wurden sowohl allgemeine als auch mitarbeiterindividuelle Abstellmaßnahmen definiert.

Die Evaluationsergebnisse haben die Eingangshypothese des Forschungsprojekts bestätigt.

4. Zuwendungsverwendung und Angemessenheit

4.1. Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftlich-technisches Personal

Für das Forschungsvorhaben wurden Zuwendungen für zwei wissenschaftliche Mitarbeiter für die Laufzeit von 24 Monaten in der Projektlaufzeit (01. Januar 2019 bis 31. Dezember 2020) geplant.

Die tatsächlich verwendeten Zuwendungen waren wie folgt:

IPMT und BGU jeweils

- 12 Personenmonate im Zeitraum 01. Januar 2019 bis 31. Dezember 2019 und
- 12 Personenmonate im Zeitraum 01. Januar 2020 bis 31. Dezember 2020

Aufgrund der kostenneutralen Verlängerung wurde die Laufzeit des Projekts um sechs Monate (Projektende 30. Juni 2021) verlängert. Die Aufwendungen der beiden Institute im Jahr 2021 wurden mittels Eigenmittel beglichen.

Somit wurden wie geplant in beiden Einrichtungen Zuwendungen zu je 24 Personenmonaten verwendet.

Geräte und Leistungen Dritter

Für das Forschungsvorhaben wurden keine Zuwendungen für Geräte und Leistungen Dritter geplant oder verwendet.

4.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Einschätzungen des Arbeitsplans über den Arbeitsaufwand haben sich als realistisch erwiesen. Das Vorgehen hat sich als sinnvoll und notwendig zur Erreichung der Ziele herausgestellt.

Für die Definition der Bewegungsübungen zur Fähigkeitsanalyse der Mitarbeiter (Arbeitspaket 1) waren 6 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um sicherzustellen, dass die entwickelte Methodik in überschaubarem zeitlichem Rahmen die wesentlichen Fähigkeiten der zu testenden Mitarbeiter ermitteln kann. Ohne der Ermittlung der individuellen Fähigkeiten wäre ein Abgleich von Fähigkeiten der Mitarbeiter und Anforderungen des Arbeitsplatzes nicht möglich ist.

Für die Datenerfassung und -aufbereitung (Arbeitspaket 2) waren 6 Monate eingeplant, aufgrund eines Technologiewechsels (von Tiefenkamera zu Motion-Tracking-Anzug) wurden für dieses Arbeitspaket 9 Monate benötigt. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um die Bewegungsübungen der Fähigkeitsanalyse so aufzubereiten, dass sie von den Algorithmen zur Fähigkeitsanalyse (Arbeitspaket 3) und zur Anforderungsanalyse (Arbeitspaket 4) gleichermaßen verwendet werden konnten. Die Arbeiten waren angemessen, da sowohl die Fähigkeitsanalyse als auch die Arbeitsabläufe an den Arbeitsplätzen darstellbar sind.

Für die Entwicklung der generischen Fähigkeitsanalyse (Arbeitspaket 3) waren 9 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um die Bewegungsfähigkeit und die Belastbarkeit der Mitarbeiter zu bestimmen. Die Arbeiten waren angemessen, da eine Methode entwickelt wurde, die den zuvor gestellten Anforderungen entspricht und Darstellungen entwickelt wurden, um einen Vergleich von Anforderungen des Arbeitsplatzes und den Fähigkeiten der Mitarbeiter anstellen zu können.

Für die generische Anforderungsanalyse (Arbeitspaket 4) waren 9 Monate geplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um die Anforderungen der Arbeitsplätze eines Unternehmens an die Beweglichkeit und Belastbarkeit der Mitarbeiter automatisiert zu erfassen. Die Arbeiten waren angemessen, da Algorithmen entwickelt wurden, die die Analyse aufgrund der Transformation der Bewegungsabläufe und der Interpolation stark beschleunigen.

Für den Fähigkeits- und Anforderungsabgleich (Arbeitspaket 5) waren 6 Monate geplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um geeignete Darstellungen zur Passung von Mitarbeitern und Arbeitsplätzen zu entwickeln. Die Arbeiten waren angemessen, da ein automatisiertes Vorgehen entwickelt wurden, die die Passung schnell beurteilen lässt.

Für das Vorgehen zur systematischen Maßnahmenableitung (Arbeitspaket 6) waren 10 Monate geplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um Maßnahmen an spezifischen Arbeitsplätzen vorschlagen zu können. Die Arbeiten waren angemessen, da Maßnahmen abgeleitet werden können, die nach dem TOP-Prinzip die Ergonomie am Arbeitsplatz verbessern sollen.

Für die Evaluation des Gesamtsystems (Arbeitspaket 7) waren 2 Monate eingeplant. Pandemiebedingt konnte die Evaluation nicht in den Unternehmen zum gewünschten Zeitpunkt durchgeführt werden. Die Verzögerungen wurden genutzt, um Optimierungen an der Software vorzunehmen. Die tatsächliche Dauer des Arbeitspakets betrug 5 Monate. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um die einzelnen Schritte der individuellen Ergonomieanalyse in Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses umzusetzen und sicherzustellen, dass die entwickelten Analysen und Algorithmen die zuvor gestellten Anforderungen erfüllen und so der Zielstellung des Forschungsvorhabens gerecht werden. Die Arbeiten waren angemessen, da die Tauglichkeit überprüft werden konnte und Weiterentwicklungspotenziale identifiziert werden konnten.

5. Vorstellung der Analysemethode

5.1. Ziele

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine Ergonomieanalyse zu entwickeln, die

- die individuelle Belastbarkeit und Bewegungsfähigkeit der Mitarbeiter erfasst und
- die Anforderungen der Arbeitsplätze an die Belastbarkeit und Bewegungsfähigkeit für jeden Mitarbeiter individuell berechnet,
- die Anforderungen und die Fähigkeiten miteinander abgleicht und dabei
- die muskuloskelettalen Belastungen für die einzelnen Mitarbeiter berechnet.

Die Methode greift diese Analyseergebnisse auf, um

- Arbeitsplätze ergonomisch zu verbessern und so die muskuloskelettalen Belastungen zu reduzieren,
- Arbeitsplätze an den individuellen Mitarbeiter anzupassen und so die individuelle Belastung von Mitarbeitern zu reduzieren und
- Arbeitsplätze zu identifizieren, die sich für individuelle Mitarbeiter mit spezifischen Einschränkungen besonders gut eignen.

-

5.2. Hardware und Software

Die Bewegungsaufnahmen werden in der Fähigkeits- und Anforderungsanalyse mit dem Motion-Tracking-Anzug *MTw Awinda* der Firma *XSens* durchgeführt. Dieser besteht aus 17 Sensormodulen, die an unterschiedlichen Körperteilen mithilfe von Klettbindern, einem T-Shirt, einem Stirnband und Handschuhen platziert werden. Dies hat den großen Vorteil, dass die Mitarbeiter ihre normale Arbeitskleidung unter dem Motion-Tracking-Anzug tragen können. Jedes Sensormodul besteht aus einem 3D-Gyroskop, einem 3D-Beschleunigungssensor und einem 3D-Magnetometer. Ein Algorithmus der zugehörigen Software *MVN Analyse* kalibriert das System mithilfe von zwölf Körpermaßen und erstellt das zugehörige Menschmodell. Mit einer Taktrate von 60 Frames pro Sekunde erfasst der Motion-Tracking-Anzug die kinematischen Daten von 23 unterschiedlichen Körpersegmenten. Mit der Software werden auch die Bewegungen aufgenommen und im Anschluss aufbereitet. Bei der Datenaufbereitung werden Messfehler durch Störeinflüsse (z.B. Drift oder Magnetfelder) minimiert.

Die im Projekt entwickelte ErgoTrack-Software wurde mit der Spiel-Engine *Unity 2019.3* programmiert. Die aufgenommenen Bewegungsdaten wurden in die ErgoTrack-Software importiert und dort weiterverarbeitet und ausgewertet.

5.3. Vorgehen

Ergebnis des Forschungsprojektes sind zwei verschiedene Analysen (Fähigkeits- und Anforderungsanalyse, wobei die Anforderungsanalyse das Fähigkeitsprofil der Fähigkeitsanalyse nutzt, um Arbeitsplätze mitarbeiterindividuell zu beurteilen, siehe Abbildung 8.

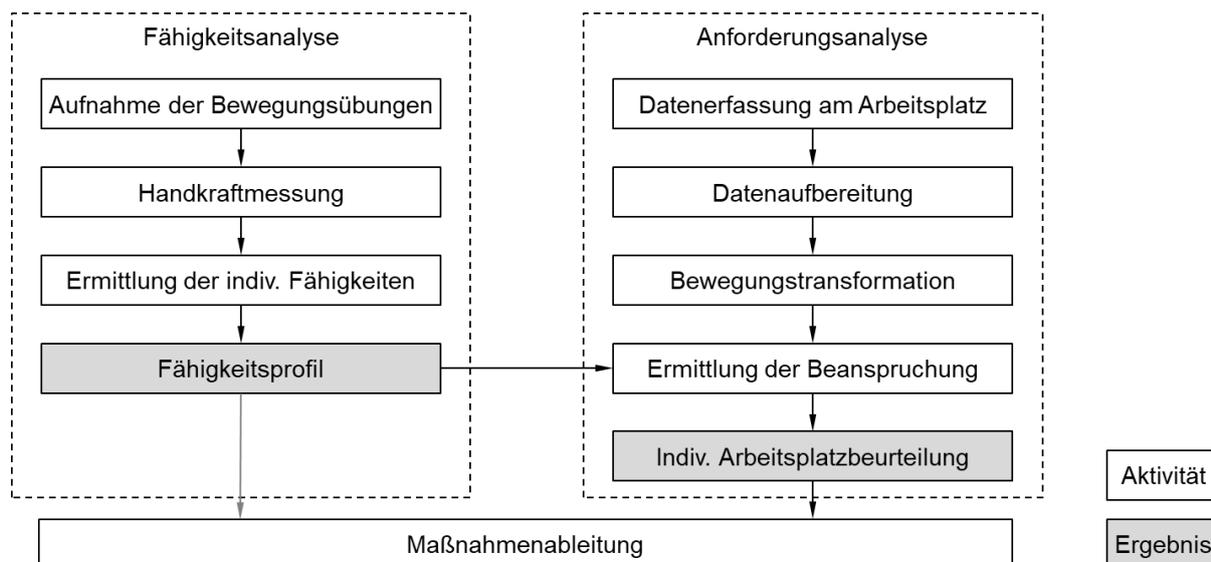


Abbildung 8: Vorgehen der Analyse

Die Fähigkeitsanalyse umfasst das Ausführen der Bewegungsübungen, die mit dem Motion-Capture-System aufgezeichnet werden und eine analoge Handkraftmessung. In der Auswertung wird ein Fähigkeitsprofil als Ergebnis der Analyse erstellt.

In der Anforderungsanalyse werden die Bewegungen am Arbeitsplatz mithilfe des Motion-Capture-Systems erfasst und mit den bewegten Gewichten verknüpft. Anschließend werden die Daten aufbereitet und die Bewegungen transformiert, um für alle Körpergrößen valide Bewegungsabläufe zu erstellen. Mithilfe des Fähigkeitsprofils kann die individuelle Beanspruchung der Mitarbeiter berechnet werden und der Arbeitsplatz individuell beurteilt werden. Sowohl aus der Arbeitsplatzbeurteilung als auch aus dem Fähigkeitsprofil können Maßnahmen abgeleitet werden, um die Beanspruchung des Mitarbeiters am Arbeitsplatz zu reduzieren. Der Fokus des Forschungsprojekts lag auf der systematischen Ableitung von Maßnahmen aus der Anforderungsanalyse.

5.4. Fähigkeitsanalyse

5.4.1. Aufnahme der Bewegungsübungen

Die Bewegungsübungen werden mit dem Motion-Tracking-Anzug aufgenommen und automatisiert ausgewertet. Hierzu sind vorab verschiedene Körpermaße des Mitarbeiters zu erfassen und die Sensoren an seinen Körpersegmenten zu platzieren. Nach erfolgreicher Kalibrierung führt der Mitarbeiter 15 definierte Bewegungsübungen durch, mit denen die Bewegungsumfänge der einzelnen Gelenke in den unterschiedlichen Körperebenen erfasst werden können. Der Methodenanwender leitet den Mitarbeiter an, indem er die Übungen erklärt und die Bewegungen ausführt, die der Mitarbeiter bei Bedarf korrigiert. Es ist darauf zu achten, dass die Bewegung in einer Ebene stattfindet, also das jeweilige Gelenk immer nur um eine Bewegungsachse gedreht wird. Jede Bewegungsübung wird zweimal ausgeführt, um zu garantieren, dass das Bewegungsmaximum erreicht wird. Sollte eine Bewegung falsch ausgeführt werden, so ist die jeweilige Übung so oft zu wiederholen, bis zwei Wiederholungen mit dem gewünschten Bewegungsablauf aufgenommen wurden. Ein Algorithmus filtert bei der Bewegungsanalyse falsche Bewegungsabläufe aus den Daten heraus.

5.4.2. Ermittlung der Handgriffkraft

Die Handgriffkraft der Mitarbeiter wird erfasst, um seine Kräftfähigkeit abzuschätzen und somit Aussagen zur individuellen Belastbarkeit treffen zu können. Die Messung findet mit einem analogen Handkraftdynamometer statt und wird über ein Eingabefeld in die entwickelte Software übertragen. Zunächst wählt der Mitarbeiter die GriffEinstellung, mit der er die höchste Handgriffkraft erreicht.

Anschließend werden je Hand drei Messungen durchgeführt, mit einem Handwechsel nach jeder Messung. Für die spätere Analyse wird der Median gewählt, um mögliche Ausreißer bei der Messung herauszufiltern.

5.4.3. Ermittlung der individuellen Fähigkeiten

Aus den Bewegungsdaten werden mithilfe der Gelenkpositionen und -rotationen die einzelnen Gelenkwinkel gemessen. Die Körperebenen werden durch die Richtungsvektoren der lokalen Gelenkkoordinatensysteme beschrieben, im Fall der Schulter beispielsweise durch die des T8-Wirbels. Die Bewegungsumfänge werden mit einem Algorithmus bestimmt, der die Gelenkwinkel für die einzelnen Übungen berechnet. Weil die Gelenkstellungen bei einigen Übungen ähnlich sind (z.B. Gelenkendstellung des Handgelenks bei der Schulterflexion und Schulterabduktion), prüft der Algorithmus verschiedene Bedingungen bei der Bewegungsausführung, wie z. B. geforderte Gelenkpositionen.

Um die Belastbarkeit der Mitarbeiter abzuschätzen, wird die gemessene Handgriffkraft mit den alters- und geschlechtsspezifischen Normwerten verglichen. Liegt der Messwert mehr als eine Standardabweichung unter dem Durchschnittswert, ist davon auszugehen, dass der Mitarbeiter eine verringerte Krafftähigkeit hat. Dies hat zur Folge, dass die Grenzwerte für Gelenkmomente der DGUV sowie die Grenzwerte für die Bandscheibenkompressionskraft aus der Dortmunder Tabelle linear herabgesetzt werden, um eine Überbelastung bei der Arbeit zu vermeiden. Eine erhöhte Handgriffkraft lässt zwar auf eine hohe Krafftähigkeit schließen, jedoch ist eine Erhöhung der Belastungsgrenzwerte nicht zweckmäßig, da hierdurch ein erhöhtes Verletzungsrisiko bestehen würde.

5.4.4. Fähigkeitsprofil

Das Ergebnis der Fähigkeitsanalyse ist ein Fähigkeitsprofil des Mitarbeiters (s. Abbildung 9). Da Standardübungen für die Ermittlung der Bewegungsfähigkeiten zum Einsatz kommen, ist es möglich, die ermittelten Bewegungsumfänge mit physiologischen Normwerten zu vergleichen. Liegt der Messwert unter der unteren Grenze der Normbereiche, so wird angenommen dass eine Einschränkung in der Bewegungsfähigkeit des jeweiligen Gelenks vorliegt. Das Fähigkeitsprofil zeigt die ermittelten maximalen Gelenkwinkel und färbt sie in Abhängigkeit von Normwerten automatisch ein (grün: innerhalb des Normbereichs; gelb: unterhalb des Normbereichs, Einschränkung der Gelenkbeweglichkeit wurde festgestellt).

Die Handgriffkraft wird gemäß des Alters und Geschlechts eingeordnet und ein Reduktionsfaktor für die Belastungsgrenzwerte abgeleitet. Er ist für beide Körperhälften definiert und der niedrigere Messwert bei der Ermittlung der Handgriffkraft wird auf die Belastungsgrenzwerte der Wirbelsäule angewendet. Aus dem Fähigkeitsprofil ist es theoretisch möglich, gezielte persönliche Maßnahmen wie z. B. Krafttraining anzuleiten. Wie eingangs erwähnt, lag der Fokus im Forschungsprojekt darauf, ergonomische Maßnahmen aus der individuellen Arbeitsplatzbeurteilung abzuleiten, weshalb es hierzu noch kein systematisches Vorgehen gibt und Maßnahmen sich primär auf technische und organisatorische Lösungen beziehen.

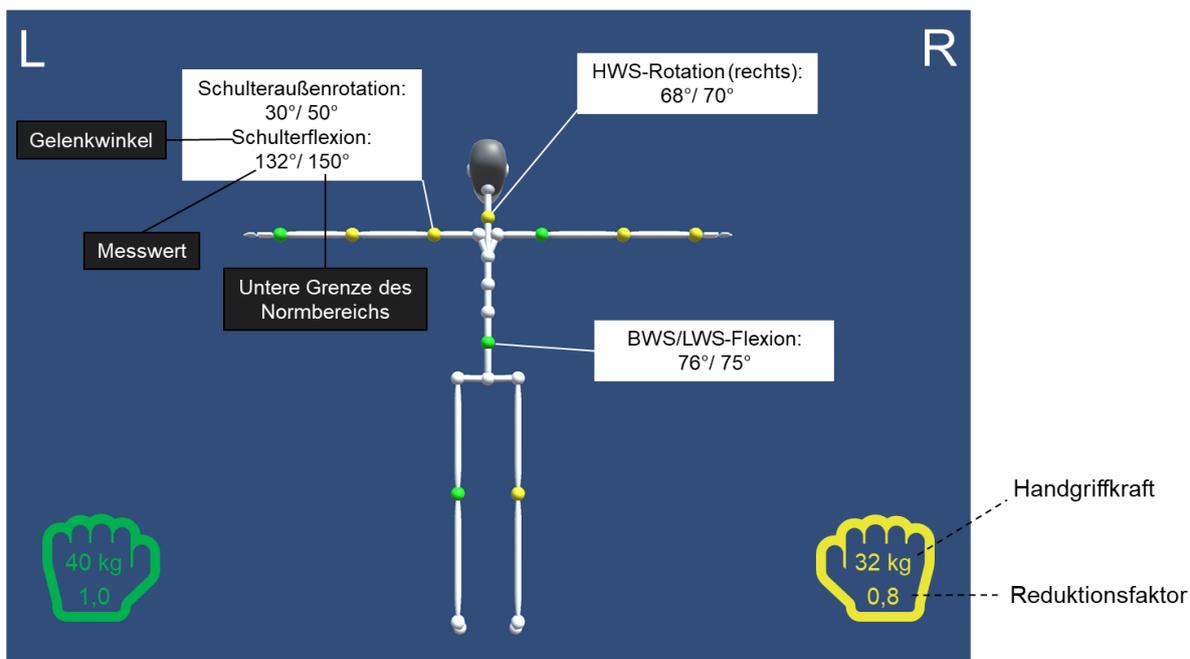


Abbildung 9: Fähigkeitsprofil eines Mitarbeiters

5.4.5. Bewertung der Fähigkeitsanalyse:

Die Anwendung in der Praxis hat aufgezeigt, dass sich die entwickelte Fähigkeitsanalyse gut anwenden lässt. Mit ca. 30 Minuten pro Mitarbeiter bewegt sich der Aufwand in einem Rahmen, der eine Analyse ganzer Abteilungen/Standorte zulässt. Es existieren allerdings noch Punkte, die verbessert werden könnten. Die Hauptpunkte sind:

- Sollte der technologische Fortschritt die Verwendung von 3D-Kameras zur Fähigkeitsanalyse zulassen, kann der Zeitaufwand auf 10-15 Minuten reduziert werden, da die Sensorplatzierung bei der Verwendung des Motion-Tracking-Anzugs wegfällt.
- Die Messung der Handgriffkraft ist ein Kompromiss aus Aufwandaufwand und Genauigkeit. Hier existieren zwar unterschiedliche Studien, die eine stark positive Korrelation zwischen der Gesamtmuskelkraft und der Handgriffkraft festgestellt haben, jedoch wurde der Zusammenhang zwischen Handgriffkraft und Belastungsgrenzwert noch nicht vollends untersucht. Die Untersuchung der Muskelkraft von weiteren Muskelgruppen für eine genauere Aussage erfordert weitere Testsysteme. Zum einen wird dadurch der Analyseaufwand vor allem zeitlich immens erhöht, was die Praktikabilität der vorgestellten Lösung vermindert. Zum anderen sind auf dem Markt erhältliche Lösungen zur objektiven Erhebung des muskulären Status oft sehr teuer.
- Bisher wurde die Fähigkeitsanalyse nur mit einer kleinen Stichprobe durchgeführt. Bei durchgängiger Anwendung wäre es möglich, eine anonymisierte Fähigkeitsdatenbank aufzubauen, mit der sich Unternehmen einordnen können. Werden beispielsweise überdurchschnittlich viele Einschränkungen derselben Körperregionen bei einer Belegschaft festgestellt, ließen sich bereits nur durch die Fähigkeitsanalysen Rückschlüsse auf die Arbeitsplatzergonomie ziehen.

5.5. Anforderungsanalyse

5.5.1. Datenerfassung am Arbeitsplatz

Um die Anforderungen des Arbeitsplatzes an den Mitarbeiter zu bestimmen, ist es notwendig, den Bewegungsablauf am Arbeitsplatz und die bewegten Gewichte aufzuzeichnen. Der Bewegungs-

ablauf wird wie in der Fähigkeitsanalyse mit dem Motion-Tracking-Anzug aufgezeichnet. Für die Prozessaufnahme ist jeder Arbeitsprozess lediglich von einem Mitarbeiter durchzuführen, dessen Bewegungsdaten in einem späteren Schritt auf andere Körpergrößen transformiert werden. Nach Möglichkeit sollte die Aufnahme mit einem Mitarbeiter mittlerer Größe gewählt werden, damit die Körpergrößenunterschiede bei der Bewegungstransformation möglichst gering sind.

Die bewegten Gewichte werden am Smartphone mit der am IPMT entwickelten Web-App *CheckIT* erfasst. Vor der Aufnahme sollte zunächst mit dem Mitarbeiter besprochen werden, welche Werkstücke und Werkzeuge im Arbeitsprozess bewegt werden und ob deren Gewichte bekannt sind. Bei Werkstücken sind diese der Stückliste zu entnehmen und bei Werkzeugen mit unbekanntem Gewicht sollte das Gewicht mit einer Waage erfasst werden. Bei der Aufnahme wird der Mitarbeiter beobachtet und beim Greifen der Last wird zuerst die Hand aufgenommen, mit der das Gewicht bewegt wird. Beim Loslassen wird anschließend die Gewichtsklasse der bewegten Last erfasst. Die Web-App speichert bei beiden Vorgängen den Zeitstempel, um die Aufnahme später mit den Bewegungsdaten zu verknüpfen.

Zusätzlich zur Bewegungs- und Gewichtsaufzeichnung kann man den Arbeitsprozess mit einer Videokamera aufnehmen, um die einzelnen Prozessschritte nachvollziehen zu können. Wird kein Video aufgenommen, ist die Analyse dennoch durchführbar, jedoch ist eine Visualisierung des Arbeitsprozesses nur mit einem Menschmodell möglich. Obwohl Arbeitsplätze, Werkzeuge, Werkstücke etc. nicht visualisiert werden, hat sich in der Praxis gezeigt, dass der durchführende Mitarbeiter die Prozessschritte anhand des Menschmodells erkennt.

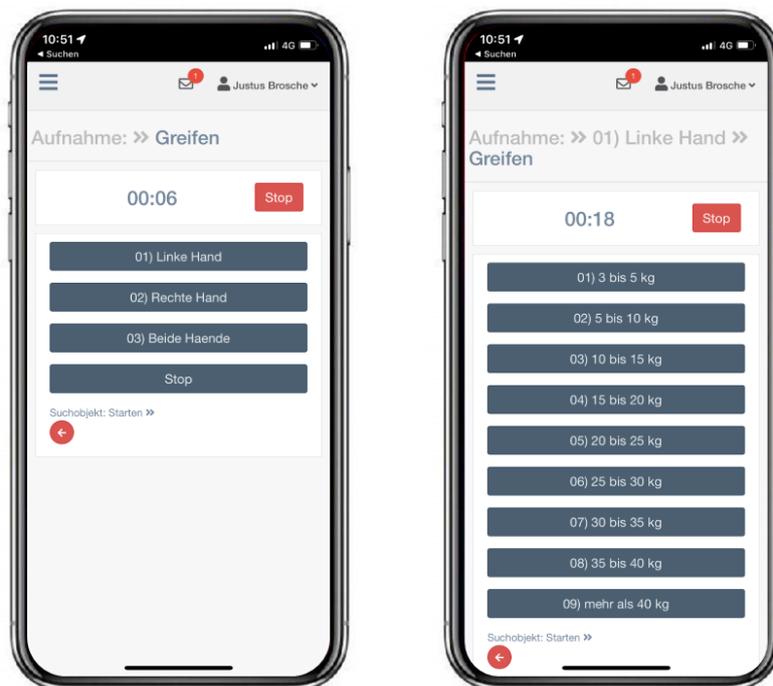


Abbildung 10: Aufnahme der Gewichte mit *CheckIT*

5.5.2. Datenaufbereitung

Die Bewegungsdaten werden vor der Analyse in der Software *MVN Analyze Pro* aufbereitet. Hier werden die Fehler in der Bewegungsaufnahme reduziert, was insbesondere aufgrund der magnetischen Einflüsse in der industriellen Umgebung notwendig ist.

Nach dem Datenimport in die ErgoTrack-Software sollten zusätzlich die Zeiträume der aufgenommenen Gewichte überprüft werden, weil die manuelle Erfassung wegen der menschlichen Reaktionszeit nicht den exakten Moment des Greifens und Ablegens wiedergibt. Hierzu wurde eine Funktion integriert, mit der der Zeitpunkt beim Greifen und Ablegen der Lasten anhand des Menschmo-

dells korrigiert werden kann. Wenn ein Video des Arbeitsprozesses aufgenommen wurde, ist es auch möglich, auf den Einsatz der Web-App zu verzichten und die Gewichte nach der Aufnahme in der Software hinzuzufügen.

5.5.3. Bewegungstransformation

Bei der Prozessaufnahme ist lediglich ein Mitarbeiter vorgesehen, der den Arbeitsprozess ausführt, um den Analyseaufwand so gering wie möglich zu halten. Weil der Bewegungsablauf stark von den individuellen Körpermaßen abhängt, ist es jedoch notwendig, die Bewegungsabläufe für die zu analysierenden Mitarbeiter zu transformieren. Das Ziel der Bewegungstransformation ist es, Körperhaltungen zu transformieren, bei denen die Handpositionen und die Blickrichtungen durch den Arbeitsprozess vorgegeben werden und somit unabhängig von der Körpergröße erreicht werden müssen (s. Abbildung 11 a)). Beispielhaft sind die Tätigkeiten *Greifen*, *Verpacken* und *Fügen* zu nennen, bei denen die Bewegungstransformation erfolgen sollte. Ein Algorithmus filtert hierzu neutrale Körperhaltungen und Transportbewegungen heraus. Für die restlichen Körperhaltungen werden die Positions- und Rotationsziele für die Hände und das Blickziel relativ zum Menschmodell berechnet. Der Bewegungsablauf wird anschließend auf die Menschmodelle der anderen Mitarbeiter übertragen und o. g. Bewegungsziele werden mit einer inversen Kinematik eingestellt (s. Abbildung 11 b)).

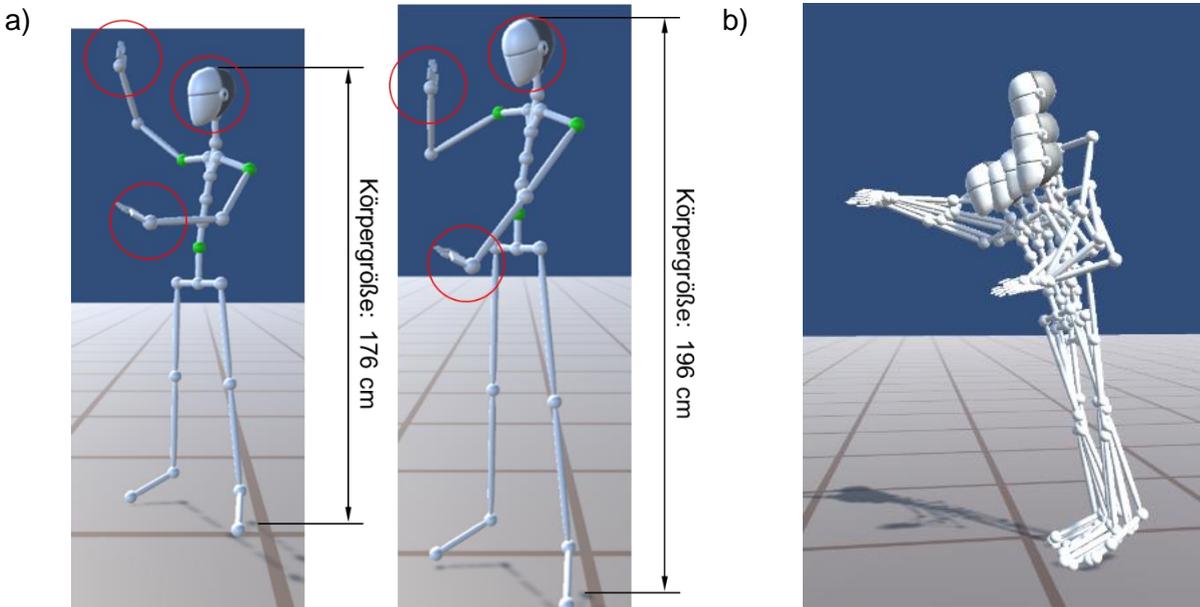


Abbildung 11: Bewegungstransformation

5.5.4. Ermittlung der Beanspruchung

Mithilfe der transformierten Bewegungsabläufe und den Fähigkeitsprofilen ist es möglich, die individuelle Beanspruchung der Mitarbeiter durch den Arbeitsplatz zu bestimmen. Die entwickelte Software ermittelt die Beanspruchung des muskuloskelettalen Systems hinsichtlich der Beweglichkeit, der Belastung und der statischen Haltung. Das Risiko, eine muskuloskelettale Erkrankung (MSE) zu erleiden, erfolgt für jede Kategorie analog zu dem Bewertungsschema der Leitmerkmalmethoden (s. Abbildung 12).

Risiko*	Belastungshöhe	a) Wahrscheinlichkeit einer körperlichen Überbeanspruchung b) Mögliche gesundheitliche Folgen	Maßnahmen
	gering	a) Eine körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich. b) Gesundheitsgefährdung nicht zu erwarten.	Keine
	mäßig erhöht	a) Eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen** möglich. b) Ermüdung, geringgradige Anpassungsbeschwerden, die in der Freizeit kompensiert werden können.	Für vermindert belastbare Personen sind Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sinnvoll.
	wesentlich erhöht	a) Körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen** möglich b) Beschwerden (Schmerzen) ggf. mit Funktionsstörungen, reversibel ohne morphologische Manifestation.	Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sind zu prüfen.
	hoch	a) Körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. b) Stärker ausgeprägte Beschwerden und/oder Funktionsstörungen, Strukturschäden mit Krankheitswert z. B. Chondrosen der LWS und HWS, Arthrosen, CTS.	Maßnahmen zur Gestaltung sind erforderlich. Sonstige Präventionsmaßnahmen sind zu prüfen.
* Die Grenzen zwischen den Risikobereichen sind aufgrund der individuellen Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen fließend. Damit darf die Einstufung nur als Orientierungshilfe verstanden werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit steigenden Punktwerten die körperliche Belastung zunimmt.			
** „Personen“ können im Sinne einer Gefährdungsbeurteilung die betroffenen Individuen sein; im Sinne einer Risikobewertung die „beabsichtigte Nutzerpopulation“.			

Abbildung 12: Bewertungsschema/Risikokzept der Leitmerkmalmethoden (BAuA, 2019)

Beweglichkeit:

Um die Beanspruchung an die Beweglichkeit zu berechnen, werden im Prozess die gleichen Gelenkwinkel berechnet wie in der Fähigkeitsanalyse und mit den Bewegungsumfängen verglichen. Anders als bei den Bewegungsübungen handelt es sich im Prozess um komplexe Bewegungen im dreidimensionalen Raum. Jede komplexe Bewegung wird bei der Auswertung in die Körperebenen projiziert und mit dem entsprechenden Bewegungsumfang verglichen. Auf diese Weise kann bei jeder Bewegung für jedes Gelenk ermittelt werden, ob ein Mitarbeiter diese ohne Überbeanspruchung der Bewegungsfähigkeit ausführen kann. Das Risiko, eine muskuloskelettale Erkrankung zu erleiden, wird gemäß der prozentualen Beanspruchung der Bewegungsfähigkeit in vier Kategorien eingeteilt (s. Abbildung 13).

Bewegungsfähigkeit	
Risiko	Beanspruchung [%]
	<50
	50-90
	90-100
	>100

Abbildung 13: MSE-Risiko (Bewegungsfähigkeit) (nach DGUV, 2020)

Belastung:

Als Belastungskennwerte ermittelt die Software die Gelenkmomente der beiden Schultergelenke und an der unteren Lendenwirbelsäule (L5/S1) sowie die Bandscheibenkompressionskraft, die an L5/S1 wirkt. Neben den bewegten Gewichten wirkt das Gewicht der distalen Körpersegmente auf das jeweilige Gelenk. Da die genaue Verteilung des Körpergewichts auf die Körpersegmente unbekannt ist, wird das Gewicht der Körpersegmente mit Normanteilen bestimmt. Beispielhaft wiegt ein Oberarm 2,8 % des Körpergewichts und der Brustkorb 21,6 %. Die Gelenkmomente ergeben sich aus dem Momentensatz, wobei die Körpersegmente zylindrisch mit mittigem Volumenschwerpunkt angenommen werden. Das Risiko, eine muskuloskelettale Erkrankung zu erleiden, wird wieder in vier Kategorien eingeteilt (s. Abbildung 14). Die Grenzwerte der vier Kategorien werden bei signifikant verminderter Handkraft mit dem jeweiligen Reduktionsfaktor multipliziert.

Gelenkmomente		
Risiko	L5/S1 [Nm]	Schulter [Nm]
	0-40	0-40
	40-80	40-80
	85-135	80-120
	>135	>120

Abbildung 14: MSE-Risiko (Gelenkmomente) (nach IFA, 2015)

Die Bandscheibenkompressionskraft ergibt sich aus dem Gelenkmoment, das auf L5/S1 wirkt und der Rumpfneigung. Entgegen der bisherigen Risikoeinordnung sind bei der Bandscheibenkompressionskraft altersabhängige Grenzwerte definiert, deren Überschreiten eine Einordnung in die höchste (rote) Risikokategorie zur Folge hat (s. Abbildung 15). Auch sie werden analog zum L5/S1-Moment mit dem kleinsten Reduktionsfaktor multipliziert.

Kompressionskraft L5/S1		
Alter	Frau [kN]	Mann [kN]
20	4,1	5,4
30	3,8	5
40	3,1	4
50	2,4	3,1
>=60	1,8	2,2

Abbildung 15: Dortmunder Richtwerte (nach Jäger, 2019)

Statische Haltungen:

Eine Haltung gilt als statisch, sobald sich mindestens ein Gelenk für mehr als 30 Sekunden nicht mehr als 5° um eine beliebige Achse bewegt hat. Das Risiko, eine MSE zu erleiden, ergibt sich aus Abbildung 16. Statische Arbeit ist die ungünstigste Form der Muskelarbeit und geht mit hohem Gesundheitsrisiko einher.

Statische Haltungen	
Risiko	Dauer [s]
	0-30
	30-60
	>60

Abbildung 16: MSE-Risiko (Statische Haltungen) (nach Kilbom, 1994)

5.5.5. Individuelle Arbeitsplatzbeurteilung

Als Ergebnis der Auswertung ist die Beanspruchung für jeden Mitarbeiter zu jedem Zeitpunkt im Arbeitsprozess bekannt. Folglich ist es nun möglich, eine Arbeitsplatzbeurteilung für jede der drei Belastungsarten für jeden Mitarbeiter zu erstellen.

Beweglichkeit:

Die individuelle Beanspruchung der Bewegungsfähigkeit gibt Aufschluss darüber, wie der Arbeitsplatz ergonomisch gestaltet ist. Um den Arbeitsprozess als Ganzes zu betrachten, werden zur Arbeitsplatzbeurteilung die zeitlichen Anteile bestimmt, in denen ein Gelenk zu mehr als 50 % seiner Bewegungsfähigkeit beansprucht wird. Für jedes Gelenk sind Bereiche definiert, die eine unterschiedliche Risikobewertung zur Folge haben (s. Abbildung 17 a)). Demnach ist es möglich, anhand

der Arbeitsplatzbeurteilung Gelenke zu identifizieren, die vom gesamten Arbeitsprozess überbeansprucht werden (s. Abbildung 17 b)).

a)

Bewegungsfähigkeit - Arbeitsplatzbeurteilung						
Risiko	Kopf/HWS [%]	Oberarme [%]	Ellenbogen [%]	Handgelenk [%]	Rumpf [%]	Knie [%]
	<6	<4	<8	<7	<5	<8
	6-19	4-13	8-23	7-20	5-15	8-23
	19-29	13-20	23-24	20-30	15-22	23-34
	>=29	>=20	>=34	>=30	>=22	>=34

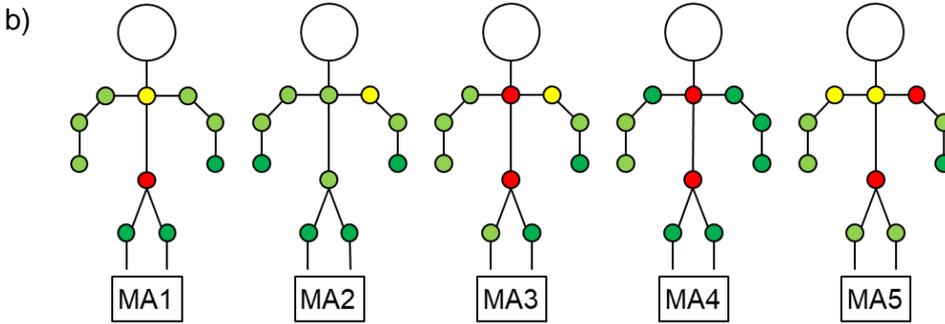


Abbildung 17: a) Risiko infolge von Haltungen mit einer Beanspruchung der Bewegungsfähigkeit über 50 % (nach DGUV, 2020) und b) beispielhafte Arbeitsplatzbeurteilung

Belastung:

Bei der Belastung können bereits kurz auftretende Überbelastungen zu Schäden am Muskel-Skelett-System führen. Vor diesem Hintergrund definiert die höchste auftretende Risikokategorie die Arbeitsplatzbeurteilung eines Gelenks (s. Abbildung 18). Wie in Abschnitt 5.5.4 beschrieben, werden die Belastungen für die beiden Schultern und die untere Lendenwirbelsäule sowie Bandscheibenkompressionskraft an L5/S1 ermittelt.

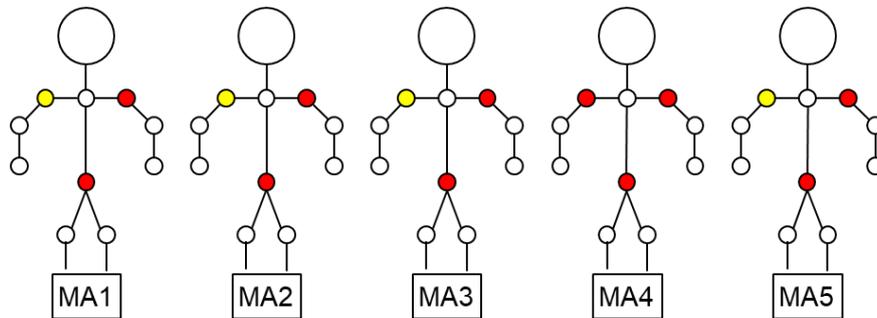


Abbildung 18: Arbeitsplatzbeurteilung der Belastung

Statische Haltungen:

Die Arbeitsplatzbeurteilung für statische Haltungen wird analog zur Belastung anhand der höchsten auftretenden Risikokategorie erstellt. Sie ist für alle Mitarbeiter gleich, weil statische Haltungen von dem aufgenommenen Bewegungsablauf abhängen und die Bewegungstransformation hierauf keinen Einfluss hat (s. Abbildung 19).

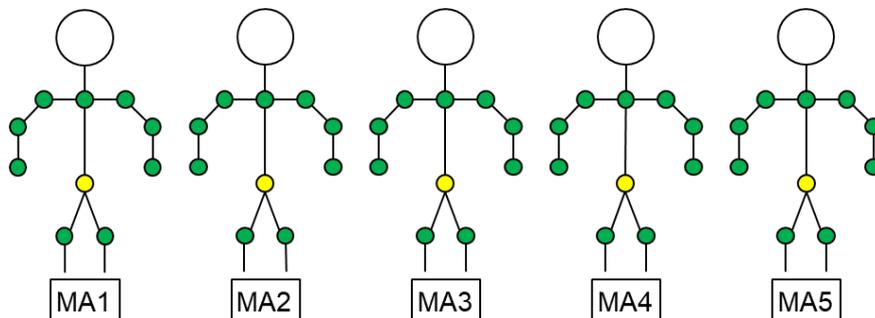


Abbildung 19: Arbeitsplatzbeurteilung der statischen Haltungen

5.5.6. Bewertung der Anforderungsanalyse

Die Anwendung in der Praxis hat gezeigt, dass sich die Anforderungsanalyse sehr gut bei Montage- und Logistikprozessen einsetzen lässt. Da bei der Datenerfassung lediglich der Bewegungsablauf und die bewegten Gewichte aufgenommen werden, ist der Analyseaufwand als gering einzuschätzen. Die Anforderungsanalyse ermöglicht eine detaillierte Ergonomiebewertung von bestehenden Arbeitsprozessen, für die kaum Vorbereitungszeit notwendig ist. Mit der Bewegungstransformation und den zuvor erstellten Fähigkeitsprofilen ist es möglich, mit geringem Aufwand die Arbeitsplatzanforderungen an den individuellen Mitarbeiter zu bestimmen. Insbesondere im Vergleich zu konventionellen Ergonomieanalysen ist der Vorteil ersichtlich. Bei einem Mehraufwand von ca. 30 Minuten pro Mitarbeiter für die Fähigkeitsanalyse kann die entwickelte Methodik die individuelle Beanspruchung des Mitarbeiters durch den Arbeitsplatz ermitteln. Darüber hinaus ist die Auflösung der Arbeitsplatzbeurteilung hervorzuheben. Anstatt eines Risikowerts, der den gesamten Arbeitsplatz beschreibt, werden die einzelnen Gelenke für die drei Belastungsarten beurteilt. So ist direkt ersichtlich, für welchen Mitarbeiter der Arbeitsplatz in welchem Körperbereich zu einer Überbelastung führt.

Trotzdem gibt es auch bei der Anforderungsanalyse Punkte, die verbessert werden könnten:

- Die Bewegungstransformation basiert auf dem Bewegungsablauf eines Mitarbeiters. Somit ist die Arbeitsplatzbewertung zwar realistisch, jedoch ist sie gleichzeitig vom ergonomischen Verhalten des Mitarbeiters abhängig, da ein mögliches ergonomisches Fehlverhalten auf die restlichen Mitarbeiter übertragen wird.
- Bei stark unterschiedlichen Körpergrößen ist eine sinnvolle Bewegungstransformation nicht garantiert. Beispielsweise ist es denkbar, dass sich ein sehr kleiner Mitarbeiter an einem Arbeitsplatz anders positioniert als ein sehr großer Mitarbeiter.
- Die Projektion komplexer Bewegungen in die Körperebenen sorgt in Grenzbereichen bei der Berechnung von Schulterflexion und -abduktion für zu hohe Gelenkwinkel. Für die Arbeitsplatzbeurteilung hat dies zwar keinen Einfluss, da in den Grenzbereichen beide Gelenkwinkel hoch sind, jedoch werden einzelne Körperhaltungen fehlerhaft als kritisch markiert.
- Die einzelnen Belastungsarten werden getrennt bewertet, ohne Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Eine ganzheitliche Bewertung analog zu den Leitmerkmalmethoden oder dem EAWS ist zum derzeitigen Zeitpunkt nicht implementiert.
- Die Anforderungsanalyse deckt noch nicht alle Belastungsarten ab. Eine Bewertung von Belastungen beim Ziehen und Schieben von Lasten, bei Kraftausübung im Finger-

Handbereich, bei Körperfortbewegung und bei der Ausübung von Ganzkörperkräften gemäß den Leitmerkmalmethoden wäre eine sinnvolle Weiterentwicklung des Systems, die den Aufwandaufwand jedoch steigern würde.

5.6. Maßnahmenableitung

5.6.1. Maßnahmenkatalog zur systematischen Maßnahmenableitung

Die Maßnahmenableitung baut auf den Ergebnissen der Anforderungsanalyse auf. Wie eingangs erwähnt, wäre eine Maßnahmenableitung auch anhand des Fähigkeitsprofils möglich, jedoch war dies nicht Teil des Forschungsprojekts. Für die Maßnahmenableitung werden zunächst die Arbeitsplatzbeurteilungen betrachtet, um festzustellen, welche Arbeitsplätze eine ergonomische Intervention erfordern. Hierbei gilt gemäß Abbildung 12, dass bei Arbeitsplätzen, bei denen die Belastung hoch ist und somit mit einem hohen Risiko eine MSE zu erleiden einhergehen, ergonomische Maßnahmen notwendig sind. Hierzu stellt die Analyseverfahren dem Anwender nicht nur die Arbeitsplatzbeurteilungen zur Verfügung, sondern zeigt zudem, wie viele Mitarbeiter zu welchem Zeitpunkt und welcher Tätigkeit einer Überbelastung ausgesetzt sind. Auch hier wird nach Belastungsart und betroffenem Gelenk unterschieden. Um den Anwender bei der Maßnahmenableitung zu unterstützen, wurde für jedes Gelenk ein Maßnahmenkatalog erstellt.

Tabelle 1 zeigt beispielhaft den Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Belastung der Schultergelenke durch eine zu hohe Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit. Die möglichen Maßnahmen sind nach dem TOP-Prinzip anzuwenden. Demnach sind zunächst technische Maßnahmen, anschließend organisatorische Maßnahmen und als Letztes persönliche Maßnahmen zu prüfen. Analog wurden Maßnahmenkataloge nicht nur für die verschiedenen Gelenke sondern auch für die Belastungsarten statische Haltung und Belastung in Abhängigkeit des Gelenks erstellt.

Tabelle 1: Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Belastung der Schultergelenke

Schultergelenk		
Ziele: Reduktion von Gelenkendstellungen und statischen Haltungen in unergonomischen Winkelbereichen / Vermeidung von Arbeiten über Schulterniveau / Minimierung der äußeren Lasteinwirkung (Schultermoment)		
Belastung	TOP	Maßnahmen
Gelenkbeweglichkeit (Fokus = Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	T	Arbeitshöhe reduzierbar? (Flexion, Abduktion verringern)
		Arbeitsfläche absenkbar? (Flexion, Abduktion verringern)
		Höhe Materialbereitstellung reduzierbar? (Flexion, Abduktion verringern)
		Höhe der Werkzeuganordnung reduzierbar? (Flexion, Abduktion verringern)
		Arbeitstritt zur Verfügung stellen?
		Höhe von Aktionspunkten (Knöpfe, Schalter etc.) reduzierbar?
		Entfernung des Aktionspunktes vom Körper reduzierbar? (z.B. Drehtisch, Schwenktisch)
		Montage- und Logistikspezifische Greifräume am AP einstellbar?
		...
	O	Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte anpassbar? (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		MA-Auswahl und -Zuweisung anpassbar? (auch bei indiv. Einschränkungen)
		Belastungsorientierte MA-Rotation möglich? (Job-Rotation)
		Ausgleichsübungen im Betrieb anbieten?
		Schulung/Unterweisung ergonomischer Verhaltensweisen und ArbeitsplatzEinstellung
		Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf vorsehen
		...
	P	Individuelle Fähigkeitssteigerung möglich/sinnvoll? (Aufklärung etc.)
		...
		...

5.6.2. Bewertung der Maßnahmenableitung

Die Maßnahmenableitung bei den Industriepartnern hat gezeigt, dass die notwendigen Verbesserungsmaßnahmen bereits anhand der Analyseergebnisse häufig leicht ersichtlich sind. Beispielhaft sind hier zu hoch platziertes Material oder die Nichtnutzung von Hebehilfen zu nennen. Demnach war die systematische Anwendung des Maßnahmenkatalogs nicht immer nötig. Bei komplexeren Bewegungen, bei denen notwendige Verbesserungsmaßnahmen nicht direkt ersichtlich waren, haben die Maßnahmenkataloge den Anwender jedoch bei der Maßnahmensuche sinnvoll unterstützt. Außerdem wurde großes Interesse von den Prozessexperten und den Mitarbeitern an den Maßnahmenkatalogen gezeigt, um ein besseres Verständnis für mögliche Verbesserungsmaßnahmen an anderen Arbeitsplätzen zu gewinnen. Es ist also anzunehmen, dass die Kataloge nicht nur zur Maßnahmenableitung, sondern auch zur ergonomischen Fortbildung in einem Unternehmen genutzt werden können.

6. Literaturverzeichnis

- BAuA (2019). MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz (Band 1). Gemeinsamer Abschlussbericht der BAuA und der DGUV. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund. doi:10.21934/baua:bericht20190821
- DGUV (2020). MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz (Band 2). DGUV Report 3/2020. Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt von BAuA und DGUV. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). Berlin.
- IFA (2015). Bewertung physischer Belastungen. In: DGUV Information 208-033 - Belastungen für Rücken und Gelenke - was geht mich das an?. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). Berlin.
- Jäger, M: Die „Revidierten Dortmunder Richtwerte“ – Erweiterte Zusammenstellung von Autopsiematerial- Messungen der statischen lumbalen Kompressionsfestigkeit zur Ableitung von Referenzwerten für eine ergonomische Arbeitsgestaltung. Zbl Arbeitsmed 69 (2019) 271-89
- SAEHAN (2021). URL: https://www.k2-verlag.de/vde/saehan-handdynamometer-professional.html?gclid=EAlaIqobChMI3pfN9OfJ8wIVkO3tCh14wgFfEAQYASABEGkPgVd_BwE, letzter Zugriff: 14.10.2021
- Kilbom, A. (1994). Repetitive work of the upper extremity: Part II - The scientific basis (knowledge base) for the guide. International Journal of Industrial Ergonomics 14, S. 59-86.
- LASI (2013). Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen bei manuellen Arbeitsprozessen: LASI-Veröffentlichung LV57. Hrsg.: Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik. Wiesbaden.
- Paulich, M.; Schepers, M.; Rudigkeit, N. & Bellusci, G. (2018). Xsens MTw Awinda: Miniature Wireless Inertial-Magnetic Motion Tracker for Highly Accurate 3D Kinematic Applications. DOI: 10.13140/RG.2.2.23576.49929
- Reallusion (2021). URL: <https://mocap.reallusion.com/iclone-motion-live-mocap/xsens.html>, letzter Zugriff: 14.10.2021
- Schepers, M.; Giuberti, M. & Bellusci, G. (2018). Xsens MVN: Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing, DOI: 10.13140/RG.2.2.22099.07205
- Schünke, M.; Schulte, E.; Schumacher, U.; Voll, M. & Wesker, K. H. (2014). Prometheus LernAtlas der Anatomie - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem (4. Ausg.). Stuttgart: Thieme.

7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabelle 2 stellt die durchgeführten Transfermaßnahmen dar.

Tabelle 2 Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Weiterbildung / Transfer in die Industrie	Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Hausinterne / externe Schulungen	Ab Projektstart
Fachkonferenzen	Wissenstransfer durch Vorträge / Vorstellungen auf Fachkonferenzen und Tagungen	Conference on Production Systems and Logistics	03/2020
		European Society of Biomechanics, Austrian Chapter	11/2020
		Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation	09/2021
		Digitales Pre-Event zum Deutschen Logistik-Kongress 2021: News from the Logistics Think Tanks, Science & Research	10/2021
Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics	03/2020
		Buchkapitel in: Competence development and learning assistance systems for the data-driven future	09/2021
Online-Veröffentlichung	Schnelle und umfassende Informationsverbreitung im Internet	IPMT-Internetseite	2020
		BGU-Internetseite	2020
		REFA Newsletter	2021
Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Diskussion der Forschungsergebnisse	Projektbegleitender Ausschuss	02/2019 11/2019 01/2021 06/2021
Ausbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	Anwendung und Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse in studentischen Arbeiten (zehn Arbeiten)	05/2019 – 06/2021
Sonstige Transfermaßnahmen	Einbeziehung eines Multiplikators	Einbindung von Technologie-Beratungen (Hagemann Consulting; Media Analyzer)	2020/2021

Tabelle 3 stellt die geplanten Transfermaßnahmen dar.

Tabelle 3 Geplante spezifische Transfermaßnahmen

	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Ausbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	Vorlesung „Produktivitätsmanagement“ am IPMT	1x im Jahr
		Erarbeitung von Vorlesungseinheiten „Biomechanik“ an der BGU	1x im Jahr
Weiterbildung / Transfer in die Industrie	Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Hausinterne / externe Schulungen	2021/2022
		Fachkraftausbildung im Rahmen von Fortbildungsmaßnahmen in der IPMT-Modellfabrik	2021/2022
Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	weitere Publikationen in Fachzeitschriften Industrie 4.0 Management Trauma und Berufskrankheit Biomedizinische Technik Computers in Industry	2021 und 2022
Online-Veröffentlichung	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Bereitstellung im Internet	Informationsdienst Wissenschaft IPMT und BGU Internetseite Newsletter BGU	2021/2022
Beratung von Unternehmen	Transfer des Methodenwissen in die Industrie	Beratungsprojekte	nach Bedarf
Sonstige Transfermaßnahmen	Wissenschaftliche Arbeit	Verwendung der Ergebnisse im Rahmen einer Dissertation	2022

Für einen erfolgreichen Transfer ist nach den Erfahrungen aus dem Forschungsvorhaben die Weiterentwicklung der Software-Prototypen und der verwendeten Algorithmen notwendig. Demnach ist die Realisierbarkeit des Transferkonzepts als hoch einzuschätzen.

8. Zusammenstellung aller veröffentlichten Arbeiten

Brosche, J.; Wackerle, H.; Lödding, H. (2020): Creating a Worker-Individual Physical Ability Profile Using a Low-Cost Depth Camera. In: Nyhuis, P.; Herberger, D.; Hübner, M. (Eds.): Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2020), S. 269-276. DOI: 10.15488/9668

Brosche, J.; Wackerle, H.; Augat, P.; Lödding, H. (2021): A Learning Assistance System for the Ergonomic Behavioural Prevention in Production. In: Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V. S. 93-108. DOI: 10.30844/wgab_2021_6

9. Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Im Rahmen des Projekts wurden durch das IPMT und/oder der BGU keine gewerblichen Schutzrechte angemeldet.

10. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20465 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., Schlachte 31, 28195 Bremen wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Hamburg, 15.10.2021

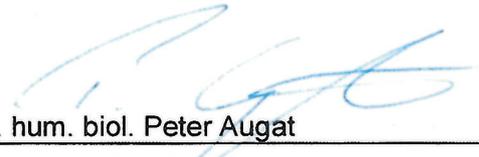
Ort, Datum


Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Name und Unterschrift des Projektleiters an der Forschungsstelle 1

Murnau, 15.10.2021

Ort, Datum


Prof. Dr. hum. biol. Peter Augat

Name und Unterschrift des Projektleiters an der Forschungsstelle 2