

# **Nutzung von Motion-Capture-Technologien zur individuellen Ergonomieanalyse in der Produktion**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Justus Brosche

aus

Göttingen

2023

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

Tag der mündlichen Prüfung: 01. November 2023



## **Wissen schafft Innovation**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödning

Prof. Dr.-Ing. Jan Hendrik Dege

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 51:

Justus Brosche

Nutzung von Motion-Capture-Technologien zur  
individuellen Ergonomieanalyse in der Produktion

1. Auflage

Hamburg 2023

ISSN 1613-8244

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.8886>

Copyright Justus Brosche 2023

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts und meinem Doktorvater Herrn Professor Hermann Lödding für die engagierte Betreuung dieser Arbeit und die wertvollen Anregungen, Kommentare und Diskussionen. Herrn Professor Thorsten Schüppstuhl danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens. Herrn Professor Dieter Krause danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke den ehemaligen Institutskollegen, die mich während meiner Promotionszeit begleitet haben. Zum einen für das tolle Arbeitsklima und die vielen spannenden fachlichen Diskussionen. Zum anderen für die gemeinsamen Abende, Reisen, Sportaktivitäten und Kaffeerunden, welche die Institutszeit auch neben der Arbeit unvergesslich gemacht haben. Ich möchte mich zudem bei allen Studierenden bedanken, die mich im Rahmen ihrer Abschluss- und Projektarbeiten unterstützt haben.

Darüber hinaus danke ich Herrn Hannes Wackerle von der BG Unfallklinik Murnau für die hervorragende Zusammenarbeit und seine ergonomische Expertise, die entscheidend zu dieser Arbeit beigetragen hat. Den kooperierenden Unternehmen danke ich für ihr Interesse an dem Thema und das kontinuierliche Feedback aus der Praxis.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie, die mich stets unterstützt haben. In den Höhen und Tiefen der Promotionszeit hatten sie stets ein offenes Ohr für mich und haben für die notwendige Ablenkung gesorgt.

Hamburg, November 2023

Justus Brosche

Im produzierenden Gewerbe sind Muskel-Skelett-Erkrankungen die Hauptursache für krankheitsbedingte Arbeitsunfähigkeitstage. Neben den wirtschaftlichen Folgen für die Unternehmen ist dies insbesondere ein Problem für die Mitarbeiter, die aufgrund der hohen Arbeitsbelastung an körperlichen Beschwerden leiden. Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels und der damit einhergehenden alternden Bevölkerung sind ergonomische und vor allem fähigkeitsgerechte Arbeitsabläufe besonders wichtig, um eine Überbelastung der Mitarbeiter zu vermeiden und ihre Gesundheit zu schützen.

Zur ergonomischen Arbeitsgestaltung kommen heute vielfach sog. Screening-Verfahren zum Einsatz, welche die Belastung am Arbeitsplatz beurteilen. Das Ergebnis ist in der Regel ein Risikowert, der die Wahrscheinlichkeit einer Überbelastung der Mitarbeiter beschreibt und die Notwendigkeit für Gestaltungsmaßnahmen aufzeigt. Bisherige Methoden vernachlässigen jedoch die individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten der Mitarbeiter.

Diese Arbeit stellt eine individuelle Ergonomieanalyse für die Produktion vor, die moderne Motion-Capture-Systeme nutzt, um die individuellen Fähigkeiten von Mitarbeitern und die Belastung am Arbeitsplatz aufwandsarm zu erfassen. Dies ermöglicht eine individuelle Beurteilung der Belastung, die Unternehmen dazu befähigt, Arbeitsplätze fähigkeitsgerecht zu gestalten. Zudem vereinfacht der hohe Detaillierungsgrad der Analyse die Identifikation kritischer Bewegungen, indem sie die Körperhaltung der Mitarbeiter für mehrere Zielregionen und Belastungsarten fortlaufend bewertet.

Die Methode umfasst eine Fähigkeitsanalyse, eine Arbeitsplatzanalyse und eine Bewegungstransformation. Die Fähigkeitsanalyse misst die Beweglichkeit und Belastbarkeit der Mitarbeiter in ca. 30 Minuten und fasst diese in einem Fähigkeitsprofil zusammen. Anschließend wird der Arbeitsablauf im Zuge der Arbeitsplatzanalyse mit einem Motion-Capture-System aufgenommen und mithilfe der individuellen Fähigkeiten ergonomisch bewertet. Da die Aufnahme von jedem Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz einen hohen Aufwand mit sich bringen würde, stellt die Arbeit zudem eine Möglichkeit vor, erfasste Arbeitsabläufe für andere Körpergrößen zu transformieren. Ein belastungs- und zielregionsspezifischer Maßnahmenkatalog unterstützt Unternehmen in der Maßnahmenableitung.

Die Methode kam bereits an einzelnen Arbeitsplätzen von Montage- und Logistikunternehmen zum Einsatz. Der Praxiseinsatz hat gezeigt, dass eine fähigkeitsgerechte Arbeitsplatzbeurteilung mit der entwickelten Methode möglich ist und Unternehmen dazu befähigt, allgemeine und individuelle Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten.

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>6</b>
2.1 Arbeitswissenschaft und Ergonomie .....	6
2.1.1 Ergonomische Gestaltung von Arbeitssystemen.....	6
2.1.2 Der Mensch im Arbeitssystem .....	9
2.2 Methoden zur Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit .....	11
2.2.1 Überblick über die Methoden .....	11
2.2.2 Messung der Handgriffkraft .....	12
2.2.3 Messung des Bewegungsumfangs .....	13
2.2.4 Evaluation der funktionellen Leistungsfähigkeit - EFL.....	14
2.2.5 ERGOS Work Simulator .....	14
2.3 Methoden zur Erfassung und Bewertung physischer Belastungen am Arbeitsplatz.....	15
2.3.1 Überblick über die Methoden .....	15
2.3.2 Rapid Upper Limb Assessment – RULA.....	17
2.3.3 Leitmerkmalmethoden – LMM .....	17
2.3.4 Integration von Menschen mit Behinderungen in die Arbeitswelt – IMBA .....	18
2.4 Digitale Menschmodelle und Motion Capture .....	19
2.4.1 Digitale Menschmodelle.....	20
2.4.2 Manipulationsfunktionen digitaler Menschmodelle .....	21
2.4.3 Motion-Capture-Technologien .....	22
2.4.4 Das verwendete Motion-Capture-System XSens MTw Awinda.	23
2.4.5 Motion-Capture-basierte Erfassung der Mitarbeiterfähigkeiten und der Arbeitsplatzbelastung .....	26
2.5 Forschungsdefizit.....	26
2.5.1 Defizite bestehender Methoden zur Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit.....	26
2.5.2 Defizite bestehender Methoden zur Erfassung und Bewertung physischer Belastungen am Arbeitsplatz .....	27

<b>3 Lösungskonzept .....</b>	<b>30</b>
3.1 Situationsanalyse.....	30
3.2 Anforderungen an das Lösungskonzept.....	34
3.3 Formulierung des Lösungskonzepts .....	36
3.3.1 Vorgehens- und Systemmodell der Analyse .....	36
3.3.2 Lösungskonzept der Fähigkeitsanalyse .....	38
3.3.3 Lösungskonzept der Arbeitsplatzanalyse.....	39
3.3.4 Lösungskonzept zur Erzeugung individueller Bewegungsabläufe .....	42
3.3.5 Technische Umsetzung des Lösungskonzepts .....	43
<b>4 Fähigkeitsanalyse .....</b>	<b>44</b>
4.1 Detaillierung der Anforderungen .....	44
4.2 Erfassung der Beweglichkeit.....	46
4.2.1 Bewegungsübungen.....	46
4.2.2 Berechnung der Gelenkwinkel .....	48
4.3 Erfassung der Belastbarkeit .....	52
4.3.1 Messung der Handgriffkraft .....	53
4.3.2 Berechnung des Reduktionsfaktors .....	53
4.4 Das ergonomische Fähigkeitsprofil .....	54
4.5 Evaluation .....	55
<b>5 Arbeitsplatzanalyse .....</b>	<b>57</b>
5.1 Detaillierung der Anforderungen .....	57
5.2 Datenerfassung am Arbeitsplatz .....	59
5.2.1 Vorbereitung der Aufnahme.....	59
5.2.2 Durchführung der Aufnahme.....	60
5.2.3 Nachbereitung der Aufnahme .....	61
5.3 Belastungskennwerte.....	62
5.3.1 Lastenhandhabung.....	62
5.3.2 Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit.....	63
5.3.3 Statische Haltungen .....	64
5.4 Individuelles Bewertungsschema für die Arbeitsplatzbelastung.....	65
5.4.1 Bewertung der Lastenhandhabung.....	66
5.4.2 Bewertung der Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit.....	68

5.4.3	Bewertung der statischen Haltung .....	70
5.5	Ergonomische Gesamtbewertung .....	70
5.6	Maßnahmenableitung .....	75
5.7	Evaluation .....	78
<b>6</b>	<b>Erzeugung individueller Bewegungsabläufe .....</b>	<b>82</b>
6.1	Detaillierung der Anforderungen .....	82
6.2	Bewegungstransformation .....	83
6.2.1	Konzept zur Bewegungstransformation .....	83
6.2.2	Ausschluss irrelevanter Bewegungen von der Bewegungstransformation .....	86
6.2.3	Erzeugung individueller Bewegungsabläufe .....	89
6.3	Analyse und Maßnahmenableitung .....	94
6.4	Evaluation .....	97
<b>7</b>	<b>Anwendung in der Industrie .....</b>	<b>102</b>
7.1	Montage .....	102
7.1.1	Fähigkeitsanalyse .....	102
7.1.2	Arbeitsplatzanalyse .....	103
7.1.3	Maßnahmenableitung .....	106
7.2	Logistik .....	108
7.2.1	Fähigkeitsanalyse .....	108
7.2.2	Arbeitsplatzanalyse .....	109
7.2.3	Maßnahmenableitung .....	111
7.3	Bewertung der Methode .....	112
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung .....</b>	<b>117</b>
8.1	Zusammenfassung .....	117
8.2	Ausblick .....	118
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>120</b>
<b>Anhang A</b>	<b>.....</b>	<b>132</b>
<b>Anhang B</b>	<b>.....</b>	<b>138</b>
<b>Anhang C</b>	<b>.....</b>	<b>142</b>

AS	Arbeitssystem
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BWS	Brustwirbelsäule
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DMM	Digitales Menschmodell
EFL	Evaluation der funktionellen Leistungsfähigkeit
FCE	Functional Capacity Evaluation
HWS	Halswirbelsäule
IMBA	Integration von Menschen mit Behinderung in die Arbeitswelt
LMM	Leitmerkmalmethoden
L5/S1	Lumbosakralgelenk
LWS	Lendenwirbelsäule
MA	Mitarbeiter
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme
MTM	Methods-Time Measurement
MTw	wireless Motion Trackern
MSE	Muskel-Skelett-Erkrankung
RULA	Rapid Upper Limb Assessment

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

### Fähigkeitsanalyse:

$q$	Quaternion [-]
$q_0$	Realteil [-]
$v$	Imaginärteil [-]
$\overrightarrow{KS}$	Vektor des Körpersegments $KS$ von Gelenkpunkt $GP_1$ zu Gelenkpunkt $GP_2$ [m]
$x_{GP_i}$	$x$ -Koordinate von Gelenkpunkt $GP_i$ [m]
$y_{GP_i}$	$y$ -Koordinate von Gelenkpunkt $GP_i$ [m]
$z_{GP_i}$	$z$ -Koordinate von Gelenkpunkt $GP_i$ [m]
$\alpha$	Winkel zwischen den Vektoren der Körpersegmente $KS_1$ und $KS_2$ [°]
$x_{\overrightarrow{KS}}$	$x$ -Komponente des Richtungsvektors $\overrightarrow{KS}$ von Körpersegment $KS$ [-]
$y_{\overrightarrow{KS}}$	$y$ -Komponente des Richtungsvektors $\overrightarrow{KS}$ von Körpersegment $KS$ [-]
$z_{\overrightarrow{KS}}$	$z$ -Komponente des Richtungsvektors $\overrightarrow{KS}$ von Körpersegment $KS$ [-]
$\overrightarrow{KS}_{p,E}$	Projektion des Richtungsvektors von Körpersegment $KS$ auf Ebene $E$ [-]
$\vec{n}_E$	Normalenvektor der Ebene $E$ [-]
$\vec{n}_{\overrightarrow{KS}_1, \overrightarrow{KS}_2}$	Kreuzprodukt der Richtungsvektoren $KS_1$ und $KS_2$ [m]
$\vec{n}_E$	Normalenvektor der Ebene $E$ [-]
$VZ_\alpha$	Vorzeichen als Indikator zur Drehrichtung des gemessenen Winkels $\alpha$ [-]
$sgn$	Signumfunktion [-]
$R$	Reduktionsfaktor [-]
$x$	Messwert der Handgriffkraft [kg]
$\bar{x}$	alters- und geschlechtsspezifischer Mittelwert der Handgriffkraft [kg]
$SA$	alters- und geschlechtsspezifische Standardabweichung der Handgriffkraft [kg]

### Arbeitsplatzanalyse:

$M_{Gelenk}$	Gelenkmoment [Nm]
$n$	Anzahl der distalen Körpersegmente [-]
$F_{g,KS_i}$	Gewicht des distalen Körpersegments $i$ [N]
$d_i$	Hebelarm des Körpersegments $i$ [m]
$m$	Anzahl der bewegten Lastgewichte (max. 2) [-]
$F_{g,LG_j}$	Gewichtskraft des bewegten Lastgewichts $j$ [N]
$d_j$	Hebelarm des bewegten Lastgewichts $j$ [m]

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$F_C$	Wirbelsäulenkompressionskraft [N]
$M_{L5/S1}$	L5/S1-Moment [Nm]
$RW$	Rumpfwinkel zwischen der Horizontalen und dem Vektor zwischen den Wirbelsäulenabschnitten L5/S1 und C7/T1 [°]
$F_{g,LG}$	Gewichtskraft des bewegten Lastgewichts [N]
$F_{g,OK}$	Gewichtskraft des Oberkörpers (Männer: 0,536 * Körpergewicht; Frauen: 0,50 * Körpergewicht) [N]
$B_{BU}$	Beanspruchung des Bewegungsumfangs [%]
$GW_P$	Gelenkwinkel GW aus dem Prozess [°]
$GW_{BU}$	Bewegungsumfang des Gelenkwinkels GW aus der Fähigkeitsanalyse [°]
$\theta_t$	Kleinster Winkel zwischen zwei Körpersegmenten zum Zeitpunkt t [°]
$q_i$	Orientierung von Körpersegment i [-]
$q_{i,j}$	Komponente j des Quaternions von Körpersegment i [-]

### Bewegungstransformation:

$v_{Becken}$	Geschwindigkeit des Beckens [m/s]
$v_{x,Becken}$	x-Komponente des Geschwindigkeitsvektors vom Becken [m/s]
$v_{y,Becken}$	y-Komponente des Geschwindigkeitsvektors vom Becken [m/s]
$v_{z,Becken}$	z-Komponente des Geschwindigkeitsvektors vom Becken [m/s]
$\vec{K}_{NNS}$	Ortsvektor der neutralen Kugel in der Neutral-Null-Stellung [m]
$x_{GP}$	x-Koordinate des Gelenkpunkts GP [m]
$y_{GP}$	y-Koordinate des Gelenkpunkts GP [m]
$z_{GP}$	z-Koordinate des Gelenkpunkts GP [m]
$L_{Arm}$	Armlänge ohne Hand [m]
$\vec{BK}_{NNS}$	Vektor vom Becken zum Kugelmittelpunkt in der Neutral-Null-Stellung [m]
$\vec{BK}_{Bew}$	Vektor vom Becken zum Kugelmittelpunkt in Bewegung [m]
$q_{Becken}$	Rotation des Beckens [-]
$\vec{K}_{Bew}$	Ortsvektor der neutralen Kugel in Bewegung [m]
$\vec{NP}_A$	Nullpunkt des Avatars A [m]
$x_{GP,A}$	x-Koordinate des Gelenkpunkts GP von Avatar A [m]
$z_{GP,A}$	z-Koordinate des Gelenkpunkts GP von Avatar A [m]

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$\overrightarrow{BZ}_{Hand}$	<i>Bewegungsziel der Hand [m]</i>
$x_{GP,0}$	<i>x-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$y_{GP,0}$	<i>y-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$z_{GP,0}$	<i>z-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$\overrightarrow{NP}_0$	<i>Nullpunkt des Avatars der Originalaufnahme [m]</i>
$\overrightarrow{RZ}_{Hand}$	<i>Rotationsziel der Hand [-]</i>
$q_{GP,0}$	<i>Orientierung des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [-]</i>
$\overrightarrow{SZ}$	<i>Sichtziel [m]</i>
$x_{GP,0}$	<i>x-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$y_{GP,0}$	<i>y-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$z_{GP,0}$	<i>z-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$q_{GP}$	<i>Rotation des Gelenkpunkts GP [-]</i>
$SD$	<i>mittlere Distanz zum Sichtziel [m]</i>
$\overrightarrow{NP}_0$	<i>Nullpunkt des Avatars der Originalaufnahme [m]</i>
$\overrightarrow{IKBZ}_{Hand,A}$	<i>Bewegungsziel der inversen Kinematik für die jeweilige Hand von Avatar A [m]</i>
$\overrightarrow{NP}_A$	<i>Nullpunkt des Avatars A [m]</i>
$\overrightarrow{BZ}_{Hand}$	<i>Bewegungsziel der Hand [m]</i>
$\overrightarrow{IKRZ}_{Hand,A}$	<i>Rotationsziel der inversen Kinematik für die jeweilige Hand von Avatar A [-]</i>
$\overrightarrow{RZ}_{Hand}$	<i>Rotationsziel der Hand [-]</i>
$\overrightarrow{x}_{Kopf,A}$	<i>x-Achse des rotierten Kopfes von Avatar A [-]</i>
$\overrightarrow{y}_{Kopf,A}$	<i>y-Achse des rotierten Kopfes von Avatar A [-]</i>
$\overrightarrow{z}_{Kopf,A}$	<i>z-Achse des rotierten Kopfes von Avatar A [-]</i>
$\overrightarrow{y}_{Kopf,A}$	<i>y-Achse des Kopfes von Avatar A vor der Bewegungstransformation [-]</i>
$\overrightarrow{NP}_A$	<i>Nullpunkt des Avatars A [m]</i>
$\overrightarrow{SZ}_A$	<i>Sichtziel des Avatars A [m]</i>
$\overrightarrow{OK}$	<i>Ortsvektor des Kopfes [m]</i>
$\overrightarrow{IKRZ}_{Kopf,A}$	<i>Rotationsziel der inversen Kinematik für den Kopf von Avatar A [-]</i>
$q_{x y z ,Kopf}$	<i>Rotation des Kopfes von Avatar A, der auf das Sichtziel ausgerichtet ist [-]</i>

### 1 Einleitung

Die Einleitung beschreibt in Abschnitt 1.1 die Problemstellung und stellt in Abschnitt 1.2 die Ziele der Arbeit vor. Abschließend geht Abschnitt 1.3 auf den Aufbau der Arbeit ein.

#### 1.1 Problemstellung

Krankheiten des Muskel-Skelett-Systems und des Bindegewebes sind mit einem Anteil von 23 % die Hauptursache für Arbeitsunfähigkeitstage in Deutschland [BAUA22a, S. 2]. Aufgrund des hohen Anteils manueller Arbeit und der erhöhten Belastung wirken sich Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) insbesondere im produzierenden Gewerbe auf die Wertschöpfung, vor allem aber auch auf das Wohlergehen der Mitarbeiter aus.

Erschwerend kommt hinzu, dass sich produzierende Unternehmen mit dem demografischen Wandel konfrontiert sehen, der zu einem steigenden Durchschnittsalter und einem starken Anstieg des Bevölkerungsanteils der über 65-Jährigen führt [OECD21]. Um ihrer Fürsorgepflicht gegenüber den Mitarbeitern nachzukommen und um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, müssen sich Unternehmen auf die sich verändernde Altersstruktur einstellen, da körperliche Beschwerden mit dem Alter zunehmen und zu einem höheren Krankenstand führen [vgl. SCHU22, S. 12-23]. Während manche Tätigkeiten leichter fallen, stellen insbesondere schwere körperliche Tätigkeiten ein zunehmendes Problem dar, weil die körperliche Leistungsfähigkeit abnimmt [BRAN09, S. 43-45]. Allgemein zeigen arbeitsmedizinische Untersuchungen, dass 20 Prozent der Mitarbeiter eine Form von Behinderungen oder Leistungseinschränkung aufweisen [BRAN09, S. 80], die Unternehmen bei der Arbeitsgestaltung berücksichtigen sollten.

Zur Reduktion der Arbeitsplatzbelastung kommen in der Regel ergonomische Screening-Verfahren zum Einsatz, welche die Körperhaltung und weitere Belastungsfaktoren des Arbeitsplatzes analysieren. Sie ermitteln Belastungskennwerte und vergleichen diese mit Literaturwerten, um das Risiko zu beurteilen, eine MSE zu erleiden. Dies ermöglicht es Unternehmen, ergonomisch kritische Arbeitsplätze und -schritte zu identifizieren. Beispielhafte Verfahren sind die Leitmerkmalmethoden (LMM) [BAUA19] und das Rapid Upper Limb Assessment (RULA) [MCAT93].

Bei der Beurteilung des ergonomischen Risikos eines Arbeitsplatzes spielen die individuellen körperlichen Merkmale eine wichtige Rolle. Im Kontext der physischen Arbeitsbelastung sind beispielhaft die Beweglichkeit, die Muskelkraft, das Körpergewicht und die Körpergröße zu nennen. Sie beeinflussen die Körperhaltung und die wirkenden Kräfte auf den Menschen und sind somit von Unternehmen bei der Risikobewertung und der anschließenden Arbeitsgestaltung zu berücksichtigen, um eine gesunde Arbeitsumgebung zu schaffen. Insbesondere die Unterschiede zwischen den Mitarbeitern sind hierbei zu

beachten. Die gängigen Methoden vernachlässigen jedoch ebendiese Unterschiede: Zum einen vernachlässigen sie die individuelle körperliche Leistungsfähigkeit, wodurch körperliche Einschränkungen, wie z. B. eine eingeschränkte Beweglichkeit oder eine verminderte Belastbarkeit, nicht in die Risikobewertung einfließen. Zum anderen vernachlässigen sie die individuellen Körpermaße der Mitarbeiter, weil die ergonomische Bewertung von jedem Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz zu zeit- und kostenintensiv wäre. Infolgedessen werden die Ergebnisse eines oder einiger weniger Mitarbeiter für ergonomische Verbesserungen verwendet, ohne die individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten zu berücksichtigen.

Darüber hinaus zeigen die Bewertungsergebnisse der gängigen Methoden lediglich anhand eines Punktwertes auf, wie dringlich eine ergonomische Maßnahme ist. Eine methodische Unterstützung bei der Arbeitsplatzverbesserung bleibt aus [BRAN16, S. 2]. Die zuständigen Mitarbeiter zur Maßnahmenableitung sind jedoch in der Regel Ingenieure und Konstrukteure, denen es an Fachwissen und methodischen Kenntnissen über ergonomische Screening-Verfahren und über bewährte Praktiken fehlt [CHAR16, S. 281]. Als Folge nutzen Unternehmen nicht das volle Potenzial, das ergonomische Arbeitsplatzanalysen bieten.

Um dem Auftreten von MSE gezielt vorzubeugen und fähigkeits- und altersgerechte Arbeitsbedingungen zu schaffen, bedarf es einer Methode, welche die Arbeitsbelastung für jeden Mitarbeiter individuell bewertet und die Unternehmen bei der Arbeitsplatzverbesserung unterstützt.

### **1.2 Zielsetzung**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, die eine mitarbeiterindividuelle Analyse der Arbeitsplatzbelastungen ermöglicht. Sie soll hierzu die Mitarbeiterfähigkeiten und die Arbeitsplatzbelastung erfassen. Ein großes Hindernis stellt der Erfassungsaufwand dar, der die Analyse einer Vielzahl von Mitarbeitern für eine Praxisanwendung schnell zu kostspielig macht. Aus diesem Grund sollen Motion-Capture-Technologien zum Einsatz kommen, die menschliche Bewegungsabläufe aufwandsarm aufzeichnen und auf digitale Menschmodelle (DMM) zur weiteren Analyse übertragen. Ein Software-Prototyp soll die Umsetzbarkeit einer derartigen Analyse aufzeigen und überprüfen.

Die Arbeit definiert vier Teilziele:

1. Aufwandsarme Erfassung der arbeitsbezogenen physischen Leistungsfähigkeit

Die Methode soll die physische Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter erfassen. Hierbei sind die zu erfassenden Merkmale der Leistungsfähigkeit so zu wählen, dass sie eine aufwandsarme Erfassung ermöglichen. Außerdem sollen sie einen direkten Bezug zum Arbeitsplatz zulassen.

2. Berücksichtigung der individuellen Fähigkeiten bei der Bewertung der Arbeitsplatzbelastung

Die Methode soll zudem die Erfassung und Bewertung der Arbeitsplatzbelastung ermöglichen. Hierbei ist die individuelle physische Leistungsfähigkeit zu berücksichtigen, um etwaige Einschränkungen bei der Bewertung der Arbeitsplatzbelastung abzubilden.

3. Unterstützung bei der Ableitung von ergonomischen Verbesserungsmaßnahmen

Die Methode soll den Mitarbeiter bei der Ableitung von ergonomischen Maßnahmen unterstützen. Sie soll hierzu die Ergebnisse der Belastungsbewertung nutzen, um möglichst spezifische Verbesserungsmaßnahmen zu empfehlen.

4. Übertragung der Ergebnisse auf verschiedene Körpermaße

In der Praxis ist es in der Regel nicht möglich, die Arbeitsabläufe aller Mitarbeiter an allen Arbeitssystemen zu erfassen und zu analysieren. Ziel ist es daher, die Analyseergebnisse eines Mitarbeiters auf die Körpermaße weiterer Mitarbeiter zu übertragen, um die Analyse ganzer Produktionsbereiche zu ermöglichen.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Abbildung 1-1 zeigt den Aufbau der Arbeit. Er orientiert sich am Grundmodell des Problemlösungszyklus aus dem Systems Engineering [DAEN02, S. 48]. Hierbei ist die gesamte Arbeit als übergeordneter Problemlösungszyklus zur Entwicklung des Gesamtsystems zu betrachten. Für die in der Lösungssuche betrachteten Subsysteme wurden jeweils eigene Problemlösungszyklen durchlaufen.

<b>Zielsuche</b>	<b>Kapitel 2: Grundlagen und Stand der Technik</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Arbeitswissenschaft und Ergonomie</li><li>- Bestehende Fähigkeits- und Arbeitsplatzanalysen</li><li>- Digitale Menschmodelle und Motion Capture</li></ul>
	<b>Kapitel 3: Situationsanalyse und Lösungskonzept</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Analyse von Montage- und Logistikprozessen</li><li>- Anforderungen an das Lösungskonzept</li><li>- Formulierung des Lösungskonzepts</li></ul>
<b>Lösungssuche</b>	<b>Kapitel 4: Fähigkeitsanalyse</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Erfassung der Beweglichkeit</li><li>- Erfassung der Belastbarkeit</li><li>- Das ergonomische Fähigkeitsprofil</li></ul>
	<b>Kapitel 5: Arbeitsplatzanalyse</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Erfassung der Arbeitsplatzbelastung</li><li>- Individuelle Bewertung der Arbeitsplatzbelastung</li><li>- Maßnahmenableitung</li></ul>
	<b>Kapitel 6: Bewegungstransformation</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Bestimmung der Bewegungsziele</li><li>- Erzeugung individueller Bewegungsabläufe</li></ul>
<b>Anwendung</b>	<b>Kapitel 7: Anwendung in der Industrie</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Praxisanwendung in einem Montageunternehmen</li><li>- Praxisanwendung in einem Logistikunternehmen</li></ul>

**Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit**

Kapitel 2 stellt im Anschluss an die Einleitung die Grundlagen und den Stand der Technik vor, um hieraus das Forschungsdefizit abzuleiten.

Kapitel 3 grenzt den Betrachtungsgegenstand in einer Situationsanalyse weiter ein und leitet Anforderungen an das Lösungskonzept ab. Dieses wird als Grobkonzept definiert und formuliert das Ziel für die anschließende Lösungssuche.

Kapitel 4 zeigt, wie man die physische Leistungsfähigkeit eines Mitarbeiters aufwandsarm abschätzen kann. Hierzu fasst das ergonomische Fähigkeitsprofil die Beweglichkeit und Belastbarkeit zusammen.

Kapitel 5 leitet ein Konzept für die individuelle Bewertung der Arbeitsplatzbelastung her. Es stellt die erfassten Daten und Belastungskennwerte vor und zeigt auf, wie man diese mithilfe des Fähigkeitsprofils eines Mitarbeiters individuell einordnen kann. Außerdem zeigt das Kapitel auf, wie Unternehmen die Ergebnisse einer Arbeitsplatzanalyse zur systematischen Maßnahmenableitung nutzen können.

Kapitel 6 leitet ein Vorgehen zur Bewegungstransformation her, das auf Basis der erfassten Bewegungen eines Mitarbeiters Bewegungsabläufe für beliebige Körpermaße generieren kann.

Kapitel 7 überprüft die Praxistauglichkeit des Konzepts. Hierzu kommt das System bei industriellen Arbeitsplätzen aus der Montage und Logistik zum Einsatz. Die Analyseergebnisse haben Unternehmen dazu genutzt, ergonomische Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel fasst die Grundlagen und den Stand der Technik dieser Arbeit zusammen. Hierzu werden zunächst die Begriffe Arbeitswissenschaft und Ergonomie eingeführt (Abschnitt 2.1). Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick über die bestehenden Methoden zur Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit (Abschnitt 2.2) und zur Erfassung und Bewertung physischer Belastungen am Arbeitsplatz (Abschnitt 2.3). Abschnitt 2.4 beschreibt mit DMM und Motion Capture zwei Technologien, mit denen die zuvor beschriebenen Methoden automatisiert werden können. Das Kapitel schließt mit der Ableitung eines Forschungsdefizits (Abschnitt 2.5).

### 2.1 Arbeitswissenschaft und Ergonomie

Die Arbeitswissenschaft hat zum Ziel, Arbeit zu humanisieren und zu rationalisieren, d. h. sie menschengerecht, aber auch effektiv und effizient zu gestalten [SCHL18, S. 6]. Im internationalen Sprachraum werden die Begriffe *Human Factors* (Arbeitswissenschaft) und *Ergonomics* (Ergonomie) synonym verwendet. Die International Ergonomics Association definiert sie als „wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Menschen und anderen Elementen eines Systems befasst bzw. als den Berufsstand, der Theorie, Grundsätze, Daten und Verfahren auf die Gestaltung von Systemen anwendet, mit dem Ziel, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren“ [IEA22] übersetzt nach [ISO26800, S. 7]. In Deutschland wird die Ergonomie hingegen als Teilgebiet der Arbeitswissenschaft angesehen, das sich mit der Anpassung der Technik an den Menschen zur Erleichterung der Arbeit befasst [BULL94, S. 3-4; LAUR92, S. 11].

Weiterhin lässt sich Ergonomie in Produkt- und Produktionsergonomie einteilen. Während sich die Produktergonomie auf die Produkte und ihre Benutzbarkeit bezieht, zielt die Produktionsergonomie darauf ab, die menschliche Arbeit in der Fertigung und Montage human und wirtschaftlich zu gestalten [SCHL18, S. 521]. Im Kontext dieser Arbeit bezieht sich der Ergonomiebegriff folglich auf die Produktionsergonomie.

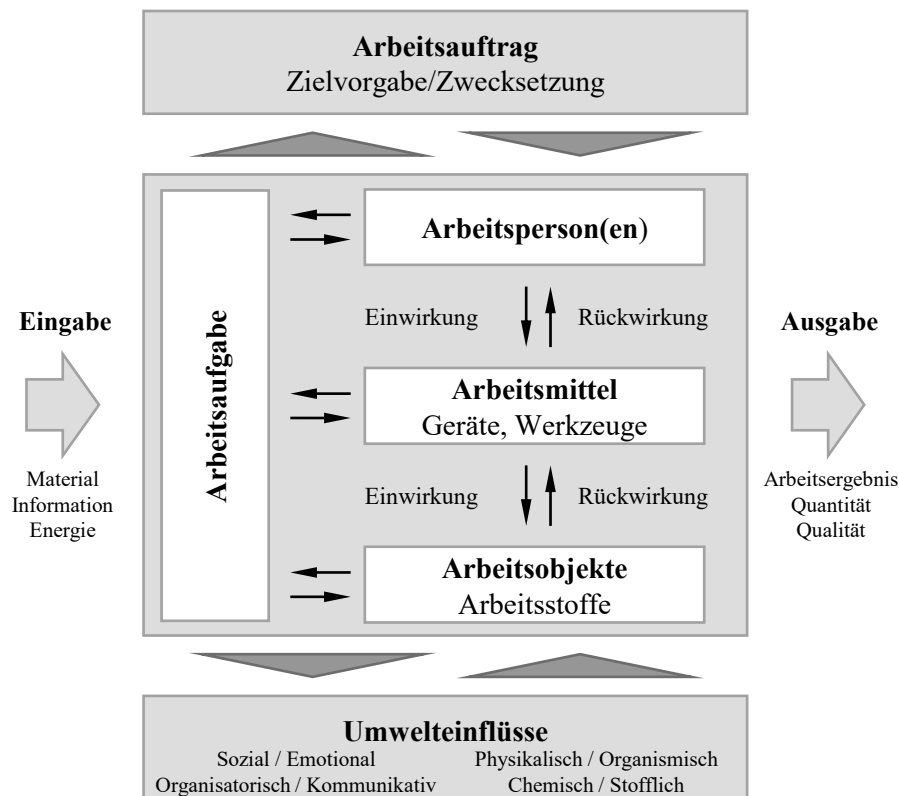
Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die ergonomische Gestaltung von Arbeitssystemen (Abschnitt 2.1.1) und den Menschen im Arbeitssystem (Abschnitt 2.1.2).

#### 2.1.1 Ergonomische Gestaltung von Arbeitssystemen

Gemäß der o. g. Ergonomiedefinition liegt der Grundstein für die ergonomische Gestaltung von Arbeitssystemen darin, dessen Elemente und ihre Wechselwirkungen mit dem Menschen zu definieren und zu verstehen. Das Modell eines Arbeitssystems stellt die Beziehungen zwischen dem arbeitenden Menschen und den Arbeitsbedingungen dar [LAUR92, S. 26]. Es ist ein Ordnungsschema, das mit den Elementen *Arbeitsperson(en)*,

*Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel, Arbeitsobjekte, Arbeitsauftrag* und *Umwelteinflüsse* eine systematische Beschreibung beliebiger Arbeitsplätze ermöglicht [SCHL18, S. 20].

Abbildung 2-1 zeigt die Wechselwirkungen zwischen der Arbeitsperson und der Arbeitsumgebung. Sie wirken als Arbeitsbelastung auf den Menschen und beanspruchen ihn in Abhängigkeit von seinen individuellen Merkmalen (z. B. Größe, Alter, Fähigkeiten; vgl. Abschnitt 2.1.2). Ziel der ergonomischen Gestaltung von Arbeitssystemen ist es, die Arbeitsbeanspruchung zu optimieren [ISO6385, S. 10]. Dieses Ziel ist auch in der Betriebsicherheitsverordnung (BetrSichV) verankert, die Arbeitgeber dazu verpflichtet, eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen und geeignete Schutzmaßnahmen abzuleiten. Hierbei verweist die Verordnung explizit auf die ergonomischen Zusammenhänge zwischen den Elementen eines Arbeitssystems [§ 3 BetrSichV].



**Abbildung 2-1: Aufbau eines Arbeitssystems in Anlehnung an [SCHL18, S. 21]**

Zur menschengerechten Gestaltung sind Belastungen zu vermeiden oder – wenn eine Vermeidung nicht möglich ist – zu verringern [DGUV22, S. 14]. Allgemein gibt es zwei mögliche Ansatzpunkte: Einerseits ist es möglich, die Rahmenbedingungen der Arbeit zu beeinflussen (*Verhältnisprävention*) und andererseits können ergonomische Maßnahmen Einfluss auf das Verhalten der Arbeitsperson nehmen (*Verhaltensprävention*) [HALB17, S. 25-26].

Das *TOP-Prinzip* des Arbeits- und Gesundheitsschutzes legt eine Rangfolge zur Umsetzung ergonomischer Maßnahmen fest. Demnach sind zunächst technische Maßnahmen (T) zum Arbeitsschutz zu prüfen. Ist dies nicht möglich, folgen organisatorische Maßnahmen (O) und erst als letzte Option sind personenbezogene Maßnahmen (P) zu erwägen [DGUV22, S. 14-15; SCHL18, S. 404]:

- T: Technische Maßnahmen, die ein Auftreten der Gefährdung verhindern, z. B. in Form von höhenverstellbaren Tischen oder Hebehilfen.
- O: Organisatorische Maßnahmen, welche die Belastung durch die Veränderung von Arbeitsablauf und -organisation verringern, z. B. durch Job-Rotation oder eine optimierte Pausengestaltung.
- P: Personenbezogene Maßnahmen, z. B. in Form von persönlicher Schutzausrüstung oder Unterweisung der Mitarbeiter.

Das TOP-Prinzip spiegelt sich auch in der Maßnahmenhierarchie zur Festlegung von Maßnahmen in Abbildung 2-2 wider. Die Wirksamkeit einer Maßnahme steigt, je näher sie an der Gefahrenquelle ansetzt, da hierdurch menschliche Fehler ausgeschlossen werden können. Gleichzeitig sinkt folglich der Schulungs- und Unterweisungsbedarf einer Maßnahme [ASTA17, S. 11-12].

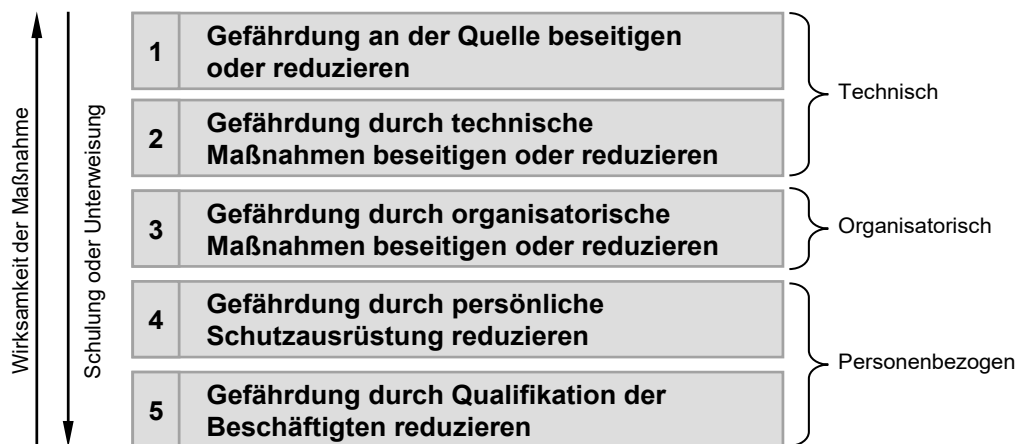


Abbildung 2-2: Maßnahmenhierarchie in Anlehnung an [ASTA17, S. 12]

Das *TOP-Prinzip* kann zum *STOP-Prinzip* erweitert werden, wobei das „S“ für Substitution steht. Hier werden Arbeitsschritte, die eine hohe ergonomische Gefahr für das Muskel-Skelett-System darstellen, durch weniger belastende Arbeitsschritte substituiert, z. B. mit Hilfe eines Technologiewechsels. Da eine Unterscheidung von T-Maßnahmen und S-Maßnahmen in der Praxis häufig nicht trivial ist, werden sie unter den T-Maßnahmen

zusammengefasst [DGUV22, S. 14]. Diese Vorgehensweise zur ergonomischen Gestaltung ist zudem in § 4 Absatz 2 BetrSichV festgehalten und ist somit auch aus rechtlicher Sicht für den Arbeitgeber verpflichtend.

### 2.1.2 Der Mensch im Arbeitssystem

Im Kontext der Ergonomie bildet der Mensch den zentralen Punkt im Arbeitssystem. Wie zuvor beschrieben steht er in einer Wirkbeziehung mit den anderen Systemelementen, wobei die Summe der Wirkungen die Belastung bildet. Hierauf aufbauend bietet das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept eine theoretische Grundlage, um die Wirkung auf den Menschen und die Auswirkung im Menschen zu unterscheiden. Es besagt, dass die gleiche äußere Belastung auf Arbeitspersonen unterschiedliche Beanspruchungen in Abhängigkeit ihrer individuellen Leistungsfähigkeit hervorruft (vgl. Abbildung 2-3) [ROHM84, S. 195-197; ROHM83, S. 9; BULL94, S. 30]. Die Beanspruchung hat sowohl positive (z. B. Lerneffekte) als auch negative Auswirkungen (z. B. Gelenkverschleiß durch Überbelastung) zur Folge, die sich mit zunehmendem Alter kumulieren können [JAEG13, S. 31-32]. Um die Beanspruchung der Arbeitsperson zu optimieren, sind demnach sowohl die Belastungen als auch die Leistungsfähigkeit des Menschen zu betrachten.

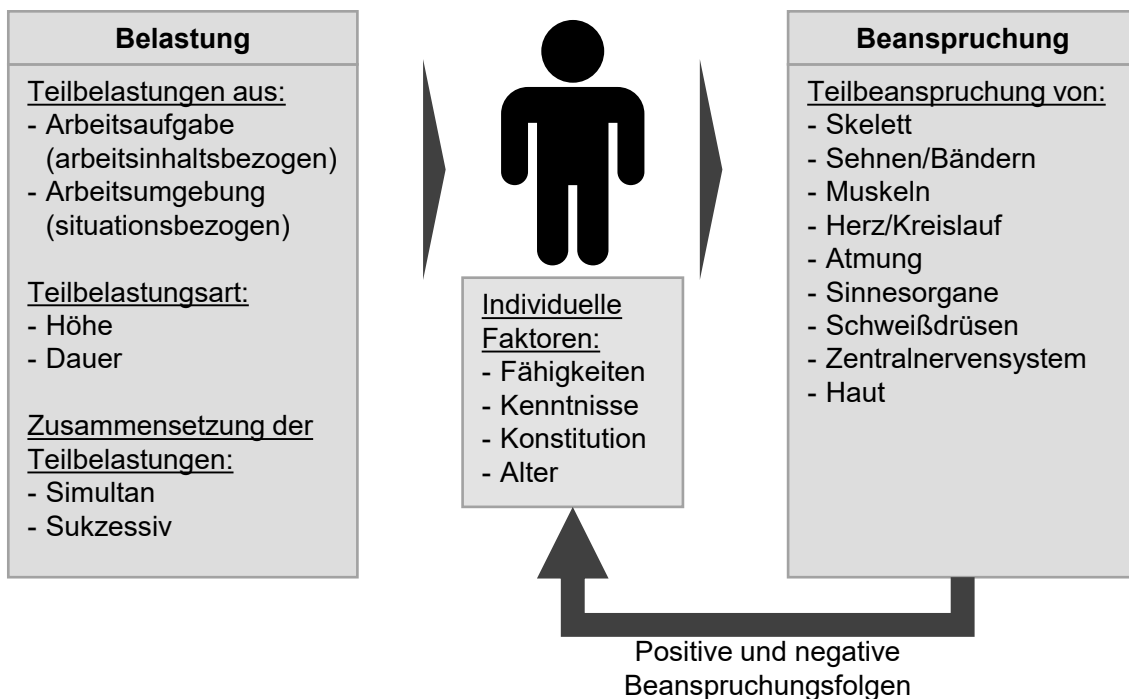


Abbildung 2-3: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept in Anlehnung an [ROHM84, S. 196; JAEG13, S. 18; BULL94, S. 30]

Die Leistungsfähigkeit des Menschen unterteilt sich in die Bereiche der physischen und psychischen Leistungsfähigkeit. Indikatoren für die physische Leistungsfähigkeit sind die Beweglichkeit, Kraftentfaltung und Ausdauer, während die Indikatoren der psychischen Leistungsfähigkeit in der Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsspeicherung zusammengefasst werden [BULL94, S. 48]. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Vermeidung von MSE liegt, greift sie im Folgenden die physische Leistungsfähigkeit noch einmal etwas genauer auf.

Im Zentrum der physischen Leistungsfähigkeit stehen das Skelett- und Muskelsystem. Das Skelettsystem ist der passive Bewegungsapparat, der aus Knochen besteht, die durch Gelenke miteinander verbunden sind. Sie haben bis zu drei Freiheitsgrade und ermöglichen so drei anatomische Bewegungsarten [BULL94, S. 52-53; RICH13, S. 2, S. 6]:

- Flexion/Extension (Beugen/Strecken)
- Adduktion/Abduktion (Heranziehen/Abziehen) und
- Pronation/Supination (Innendrehung/Außendrehung)

Das Muskelsystem, der aktive Bewegungsapparat, ist über Sehnen mit den Knochen verbunden und ist für die Entstehung der Kraft und somit auch der aktiven Bewegung verantwortlich [RICH13, S. 3]. Grundsätzlich lassen sich zwei Formen der Muskelarbeit unterscheiden [BULL94, S. 55-56; SCHL18, S. 142-143]:

- Statische Muskelarbeit (Haltungs- und Haltearbeit)
- Dynamische Arbeit (einseitige dynamische Arbeit und schwere dynamische Arbeit)

Für die physische Leistungsfähigkeit sind in der Arbeitswissenschaft zudem die Körpermaße von besonderem Interesse. Die *Anthropometrie* bildet als Wissenschaft von den Maßen des menschlichen Körpers die theoretische Grundlage für die ergonomisch-räumliche Gestaltung von Arbeitssystemen. Sie unterteilt die Körpermaße in die räumlichen Begrenzungsmaße (Skelett- und Umrissmaße) und die Funktionsmaße (z. B. Bewegungsbereiche und Reichweiten) des menschlichen Körpers [BULL94, S. 54; SCHL18, S. 477-478]. Für die ergonomische Gestaltung ist nicht nur die Körpergröße entscheidend, sondern ebenfalls die einzelnen Körpermaße, wie z. B. die Schulterhöhe oder die Armlänge, da diese relativ stark unabhängig voneinander sind [DIN33402, S. 80].

Abbildung 2-4 zeigt die Verteilung der Körpergrößen von Männern und Frauen. Sie ermöglicht es, Arbeitsplätze allgemeingültig zu gestalten. Hierzu werden Körpergrößenklassen gebildet und allgemein eine Gestaltung empfohlen, die sowohl das 5. Perzentil

der Frauen als auch das 95. Perzentil der Männer einschließt und somit ca. 95 % der Bevölkerung abdeckt. Bei sicherheitsrelevanten Maßen erhöht sich die Spanne auf das 1. bzw. 99. Perzentil [SCHL18, S. 478-480].

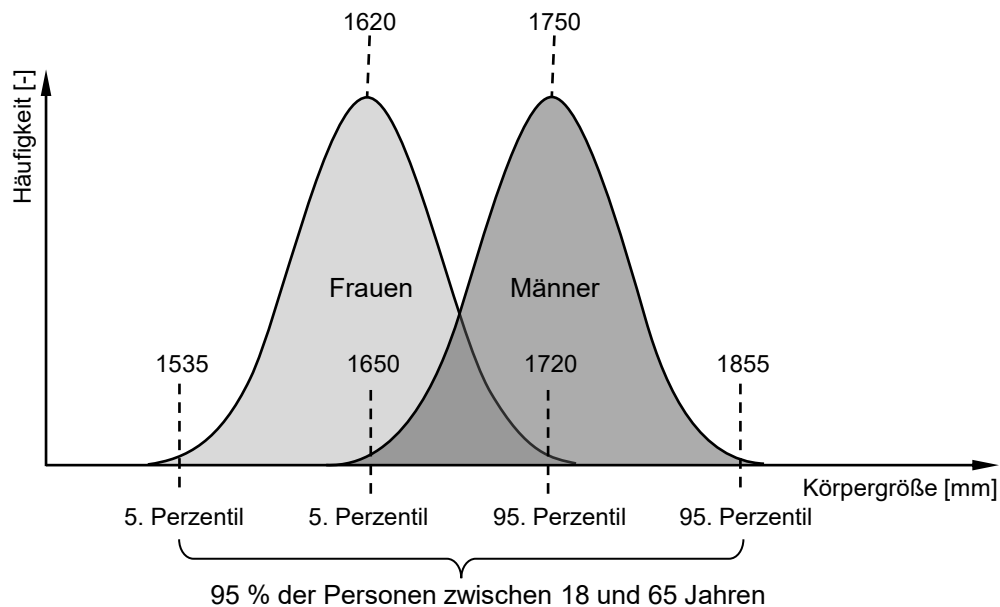


Abbildung 2-4: Verteilung der Körpergrößen von Frauen und Männern und ihre Einteilung in Perzentile in Anlehnung an [SCHM22, S. 107] nach [DIN33402]

## 2.2 Methoden zur Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit

Um Arbeitsplätze individuell auf den Mitarbeiter abzustimmen, ist es notwendig, seine körperliche Leistungsfähigkeit einzuschätzen. Abschnitt 2.2.1 gibt hierzu zunächst einen Überblick über die Methoden. Die folgenden zwei Abschnitte stellen die Messung der Handgriffkraft (Abschnitt 2.2.2) und des Bewegungsumfangs (Abschnitt 2.2.3) vor. Abschließend werden mit der Evaluation der funktionellen Leistungsfähigkeit (Abschnitt 2.2.4) und dem ERGOS Work Simulator (Abschnitt 2.2.5) zwei Verfahren aus der Gruppe der FCE beschrieben.

### 2.2.1 Überblick über die Methoden

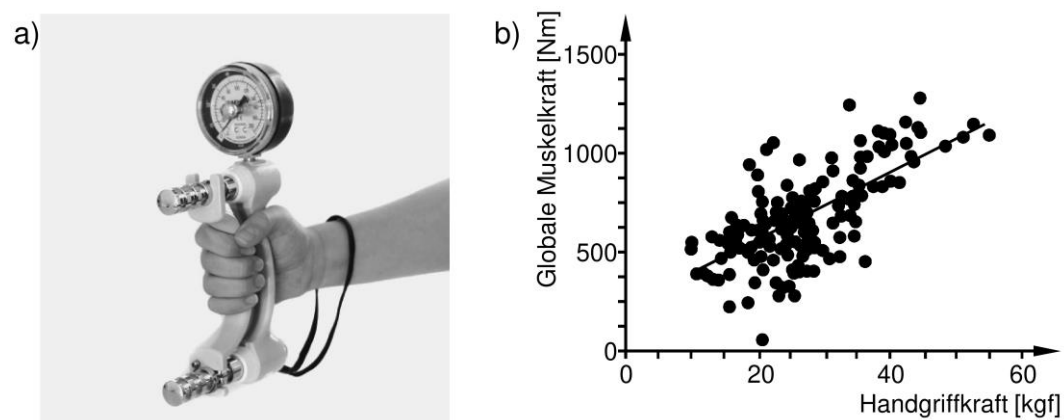
Zur Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit gibt es eine Vielzahl an Methoden, die sich in ihrem Aufwand, ihrer Aussagekraft und ihrem Bezug zum Arbeitsplatz unterscheiden. Auf der untersten Ebene gibt es Methoden, die einzelne Ausprägungen der Leistungsfähigkeit messen, wie zum Beispiel einzelne Kraftwerte oder die Beweglichkeit einer Person. Beispielhafte Erfassungsmethoden sind die Messung der Handgriffkraft (Abschnitt 2.2.2) oder die Messung der Bewegungsumfänge (Abschnitt 2.2.3).

Standardisierte Assessments fassen mehrere dieser Erfassungsmethoden zusammen, um ein umfassendes Bild der Leistungsfähigkeit eines Menschen zu geben. Die wichtigste Gruppe zur Messung der arbeitsbezogenen Leistungsfähigkeit bilden die sog. Functional Capacity Evaluations (FCE). Beispielhafte FCE sind die Evaluation der funktionellen Leistungsfähigkeit nach Isernhagen (Abschnitt 2.2.4), der ERGOS Work Simulator (Abschnitt 2.2.5) und die Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit ELA.

Für eine umfangreiche Übersicht über die verfügbaren Methoden sei auf die Datenbank des Instituts für Qualitätssicherung in Prävention und Rehabilitation an der Deutschen Sporthochschule Köln verwiesen, die unter [www.assessment-info.de](http://www.assessment-info.de) abrufbar ist [IQPR23].

### 2.2.2 Messung der Handgriffkraft

Eine einfache Methode zur Abschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit ist die Messung der Handgriffkraft. Das Standardwerkzeug hierzu ist das analoge Handkraftdynamometer (vgl. Abbildung 2-5a). Die Handgriffkraft ist mittels Zusammendrücken des Messgeräts innerhalb weniger Sekunden erfasst. Verschiedene Studien [z. B. PORT19; WIND10] zeigen eine signifikant positive Korrelation der Handgriffkraft mit der globalen Muskelkraft (vgl. Abbildung 2-5b).



**Abbildung 2-5: Messung der Handgriffkraft: a) Handdynamometer [SPOR23]; b) Zusammenhang zwischen globaler Muskelkraft und Handgriffkraft in Anlehnung an [PORT19, S. 275]**

Die Gesamtmuskelkraft ist je nach Studie unterschiedlich definiert: Porto et al. definieren sie als Summe der maximalen Muskelmomente des Rumpfes und der dominanten Muskelgruppen der unteren Extremitäten, während Wind et al. sie als Summe der Muskelkräfte von Schulterabduktoren, Hüftbeugern und Knöchel-Dorsalflexoren definieren. Dieser Zusammenhang besteht für beide Geschlechter, wobei es bei den Messwerten geschlechterspezifische Unterschiede gibt. Männer haben durchschnittlich eine höhere Handgriffkraft als Frauen. Generell sinkt die Handgriffkraft mit zunehmendem Alter,

nachdem sie zwischen 30 und 40 Jahren ihr Maximum erreicht hat [STEI16]. Die Abbildung zeigt jedoch auch, dass die globale Muskelkraft auch bei vergleichbarer Handgriffkraft verhältnismäßig stark streut, so dass die Handgriffkraft für einen individuellen Menschen nur ein Indiz für eine bestimmte globale Muskelkraft sein kann.

### 2.2.3 Messung des Bewegungsumfangs

Die Messung des Bewegungsumfangs erfolgt typischerweise mit einem Winkelmesser (sog. Goniometer), der an das zu vermessende Gelenk angelegt wird. Ziel der Messung ist es, das Bewegungsmaß um die jeweiligen Drehachsen zu ermitteln. Hierbei ist der aktive und passive Bewegungsumfang zu unterscheiden. Den aktiven Bewegungsumfang erreicht eine Person aus eigener Kraft, während beim passiven Bewegungsumfang eine äußere Kraft die Bewegung steuert.

Als standardisiertes Aufnahmeverfahren hat sich die Neutral-Null-Methode etabliert. Sie definiert die Neutral-Null-Stellung, bei der eine Person aufrecht steht, die Arme mit den Handflächen nach innen hängen lässt und die Füße parallel nach vorne ausrichtet (vgl. Abbildung 2-6). Die Messung der Gelenkwinkel erfolgt relativ zu dieser neutralen Haltung [SALI15, S. 2-4].

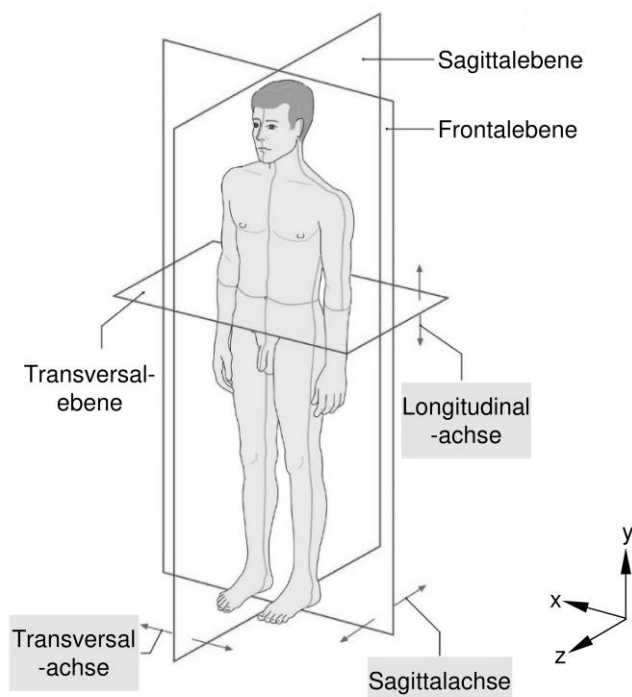


Abbildung 2-6: Neutral-Null-Stellung und die Körperachsen und -ebenen [SCHÜ18]

Zur Beschreibung der Bewegungen eignen sich die Körperebenen, die ebenfalls in Abbildung 2-6 eingezeichnet sind. Die Ebenen stehen senkrecht zueinander und teilen den Körper in links und rechts (Sagittalebene), oben und unten (Transversalebene) sowie vorne und hinten (Frontalebene). Zur Erfassung der Schulterflexion bzw. -extension bewegt eine Person ihren Arm beispielsweise in der Sagittalebene mit der Transversalachse als Drehachse [ELVA20, S. 13-15]. Derartig standardisierte Bewegungen ermöglichen es, die Messergebnisse mit Normwerten [z. B. SCHÜ18] zu vergleichen und defizitäre Gelenke zu identifizieren.

Abbildung 2-6 führt zudem das in dieser Arbeit verwendete Koordinatensystem ein. Die x-Achse eines menschlichen Körpers zeigt von links nach rechts, die y-Achse nach oben und die z-Achse in die Richtung, in die der Körper ausgerichtet ist.

### **2.2.4 Evaluation der funktionellen Leistungsfähigkeit - EFL**

Die Evaluation der funktionellen Leistungsfähigkeit (EFL) von Susan Isernhagen umfasst 29 standardisierte Leistungstests, welche die arbeitsbezogene physische Belastbarkeit erfassen. Bei der Datenerhebung stellen die Probanden in Testsituationen typische Arbeitsaktivitäten wie z. B. Schieben, Heben oder Tragen nach. Hierbei beobachtet sie ein Experte und bewertet die Ausführung und Muskelaktivität nach definierten Kriterien mit dem Ziel, die maximale Leistungsfähigkeit der Testperson zu erfassen. Beispielsweise steigert sich bei den Hebe- und Trag-Tests sukzessive das Gewicht in fünf bis sechs Stufen, bis die Ausführung nicht mehr ergonomisch oder sicher ist [OLIV06, S. 77-79].

Die Belastbarkeit während eines achtstündigen Arbeitstags wird mithilfe von Erfahrungswerten für jede Belastungsart abgeschätzt und in einem tabellarischen Leistungsprofil zusammengefasst. Mit diesem Profil ist es anschließend möglich, die Fähigkeiten mit den Arbeitsplatzanforderungen abzugleichen. Zusätzlich schätzt sich der untersuchte Mitarbeiter mit dem Assessmentssystem PACT (Performance Assessment Capacity Testing) selbst ein, um Unterschiede zwischen wahrgenommener und gemessener Leistungsfähigkeit zu erkennen [KAIS00b, S. 298-299]. Die EFL-Tests verteilen sich auf zwei Tage und in Summe liegt der Zeitaufwand bei ca. sechs Stunden inklusive Evaluation und Bericht [OLIV06, S. 75].

### **2.2.5 ERGOS Work Simulator**

Der ERGOS Work Simulator ist ein maschinenbasiertes Testsystem, das die funktionelle Arbeitsfähigkeit erfasst. Es besteht aus fünf Testblöcken, die jeweils unterschiedliche Belastungsarten testen, wie z. B. statisches und dynamisches Heben oder Ganzkörperbeweglichkeit (vgl. Abbildung 2-7). Die untersuchte Person führt die einzelnen Tests mit dem Arbeitssimulationsgerät durch und wird von diesem audiovisuell angeleitet, weshalb die

Methode eine hohe Standardisierung und Zuverlässigkeit erreicht. Zusätzlich beobachtet ein Experte die Testdurchführung. Die einzelnen Tests dauern ca. vier bis fünf Stunden und die Testergebnisse werden für das Leistungsprofil auf einen 8-Stunden-Tag extrapoliert. Mithilfe einer Job-Datenbank ist ein Job-Matching möglich, um die Berufseignung oder Wiedereingliederung abzuklären. Neben diesen FCE-typischen Einsatzgebieten eignet sich das System auch als Trainingsgerät, das die Trainingsbelastung individuell steuert und einen arbeitsspezifischen Trainingsplan erstellt [KAIS00a; OLIV06, S. 81-83].

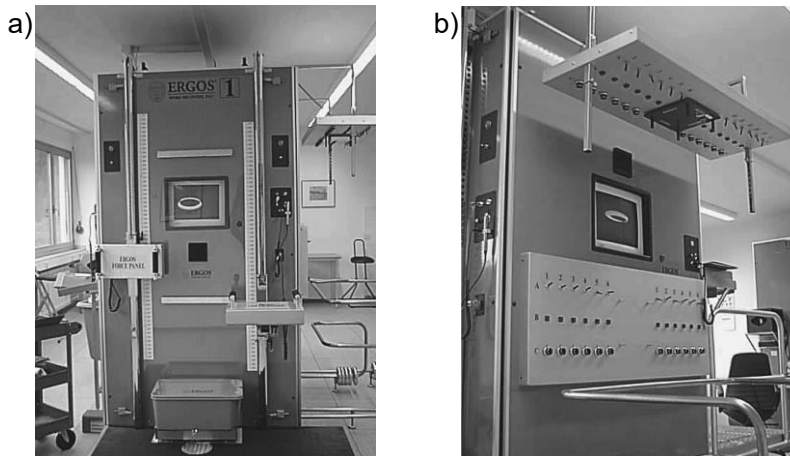


Abbildung 2-7: ERGOS Work Simulator: a) Testblock 1 - Statisches und dynamisches Heben; b) Testblock 2 - Gesamtkörperbeweglichkeit [KAIS00a, S. 176-177]

### 2.3 Methoden zur Erfassung und Bewertung physischer Belastungen am Arbeitsplatz

Zur Erfassung und Bewertung der Belastungen am Arbeitsplatz existieren verschiedene Methoden. Abschnitt 2.3.1 gibt einen Überblick über die bestehenden Methoden. Die anschließenden Abschnitte erläutern beispielhaft drei Methoden, die sich in der Industrie etabliert haben. Abschnitt 2.3.2 stellt hierzu das Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Abschnitt 2.3.3 die Leitmerkmalmethoden (LMM) und Abschnitt 2.3.4 das Verfahren Integration von Menschen mit Behinderung in die Arbeitswelt (IMBA) vor.

#### 2.3.1 Überblick über die Methoden

Mit zunehmender Wichtigkeit einer menschengerechten Gestaltung der Arbeit haben sich verschiedene Methoden etabliert, um die physischen Belastungen am Arbeitsplatz zu erfassen und zu bewerten. Die sogenannten Screening-Verfahren lassen sich gemäß ihrer Genauigkeit und potenziellen Nutzergruppen in unterschiedliche Ebenen einteilen (siehe Tabelle 2-1). Die Nutzergruppen reichen von betrieblichen Praktikern über Ergonomie-Experten bis hin zu Wissenschaftlern. Mit steigender ergonomischer Expertise der Nutzergruppe nimmt auch der Detaillierungsgrad der Methoden zu.

**Tabelle 2-1: Ebenen zur Erfassung und Bewertung physischer Belastungen am Arbeitsplatz in Anlehnung an [ELLE10b, S. 39; SCHM22, S. 233]**

Anwender	Screening-Ebene		Beispielhafte Methoden
Betriebliche Praktiker	niedrig	Grob-Screening-Verfahren	- Basis-Check und Einstiegsscreening bei körperlichen Belastungen [BAUA22b]
		Spezielle Screening-Verfahren	- RULA [MCAT93] - REBA [HIGN00] - IAD BkB [GHEZ07]
Ergonomie-experten	Detailierungsgrad	Experten-Screening-Verfahren	- Der montagespezifische Kraftatlas [WAKU09] - EAWS [SCHA13] - OWAS [KARH77]
		Betriebliche Messungen	- CUELA [ELLE10a] - Elektromyographie (EMG) - Motion-Capture-Systeme (Abschnitt 2.4.3)
Wissenschaftler	hoch	Labormessungen/ Simulation	- Der Dortmunder [JÄGE00]

*Grob-Screening-Verfahren* haben den geringsten Detaillierungsgrad und dienen zur Orientierung. Der betriebliche Praktiker ermittelt z. B. mithilfe von Checklisten Belastungsschwerpunkte, die anschließend mit *speziellen Screening-Verfahren* näher betrachtet werden. Die Methoden dieser Kategorie ermöglichen eine genauere, praxisnahe Beurteilung und fokussieren spezielle Belastungen. Daher eignen sie sich vor allem für zyklische Arbeitsprozesse mit gleichartigen Belastungen. Die Bewertung komplexerer Belastungssituationen erfordert eine detailliertere Analyse der Arbeitssituation. So eignen sich *Experten-Screening-Verfahren* beispielsweise für die gemeinsame Bewertung verschiedener Belastungsarten. *Betriebliche Messungen* kommen zum Einsatz, wenn es erforderlich ist, den zeitlichen Verlauf von Belastung und Entlastung zu erfassen und zu bewerten, oder ein höherer Differenzierungsgrad notwendig ist. Es kommen Messsysteme zum Einsatz, die vor allem Körperhaltungen und -bewegungen im Arbeitsprozess erfassen, aber auch Kräfte messen. Die präzisesten Ergebnisse zur Analyse physischer Belastungen liefern *Labormessungen*. Unter standardisierten Bedingungen werden hier Belastungssituationen nachgestellt, um die Analyseergebnisse z. B. für Bewertungsschemata anderer Methodenebenen zu nutzen [vgl. BAUA19, S. 38-43; ELLE10b, S. 386-388].

### 2.3.2 Rapid Upper Limb Assessment – RULA

Das RULA-Verfahren wurde von McAtamney und Corlett [MCAT93] als ergonomische Schnellanalyse entwickelt, um Arbeitsplätze zu untersuchen, an denen arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen der oberen Extremitäten auftreten. Hierzu erfasst der Anwender verschiedene Risikofaktoren. Neben Gelenkwinkeln der oberen Extremitäten und des Oberkörpers sind ebenfalls Informationen zur Muskelarbeit (statisch oder repetitiv) und zur Lastwirkung zu erfassen. Jeder Risikofaktor ist abhängig von seiner Ausprägung mit einem Punktwert behaftet und wird mithilfe von Tabellen zu einer Gesamtpunktzahl zusammengefasst, die das ergonomische Risiko der Körperhaltung am Arbeitsplatz beschreibt. Hier werden vier unterschiedliche Handlungsstufen unterschieden [vgl. MCAT93, S. 92-98]:

- 1 - 2: Die Körperhaltung ist akzeptabel, wenn sie nicht über längere Zeiträume oder wiederholt eingenommen wird.
- 3 - 4: Es sind weitere Untersuchungen notwendig und Veränderungen am Arbeitsplatz sind möglicherweise erforderlich.
- 5 - 6: Untersuchungen und Veränderungen am Arbeitsplatz sind bald erforderlich.
- 7: Weitere Untersuchungen und Veränderungen am Arbeitsplatz sind sofort erforderlich.

Als spezielles Screening-Verfahren erfreut sich das RULA-Verfahren einer hohen Beliebtheit, da es als Beobachtungsverfahren während des Prozesses oder per Videoanalyse einfach anzuwenden ist. Nachteile dieser Methode liegen jedoch in ihrer Subjektivität bei der Bewertung [vgl. ROBE09; DOCK12] und der Bewertung diskreter Körperhaltungen [PLAN17, S. 563]. Wie aus den unterschiedlichen Handlungsstufen bereits ersichtlich wird, ist eine alleinige Anwendung der Methode zur Ableitung von ergonomischen Maßnahmen nicht vorgesehen und es sollte immer eine weitere Analyse nach sich ziehen. Demnach unterstützt das RULA weder eine Beurteilung des Risikos einzelner Körpersegments oder eine Maßnahmenableitung, noch berücksichtigt es die individuellen Fähigkeiten des Mitarbeiters.

### 2.3.3 Leitmerkmalmethoden – LMM

Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) hat die Leitmerkmalmethoden ursprünglich als spezielle Screening-Verfahren entwickelt, die eine schnelle und praxisnahe Gefährdungsbeurteilung von Arbeitsplätzen ermöglichen sollen. Unterschieden werden die Belastungsarten *manuelles Heben, Halten und Tragen von Lasten* [JÜR01], *manuelles Ziehen und Schieben von Lasten* [JÜR02] oder *manuelle Arbeitsprozesse* [STEI12] untersucht. Im Zuge des Gemeinschaftsprojekts *MEGAPHYS* der BAuA und der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) wurden die beste-

henden Leitmerkmalmethoden zum einen weiterentwickelt und um weitere Belastungsarten (*Ganzkörperkräfte, Körperfortbewegung* und *Körperzwangshaltungen*) erweitert [vgl. BAUA19]. Zum anderen wurden Konzepte für die Methodenebenen *Experten-Screening* [vgl. BRUD20], *Messtechnische Analyse* [vgl. WEBE20] und *Labormessungen/Simulation* [vgl. JÄGE20] entwickelt.

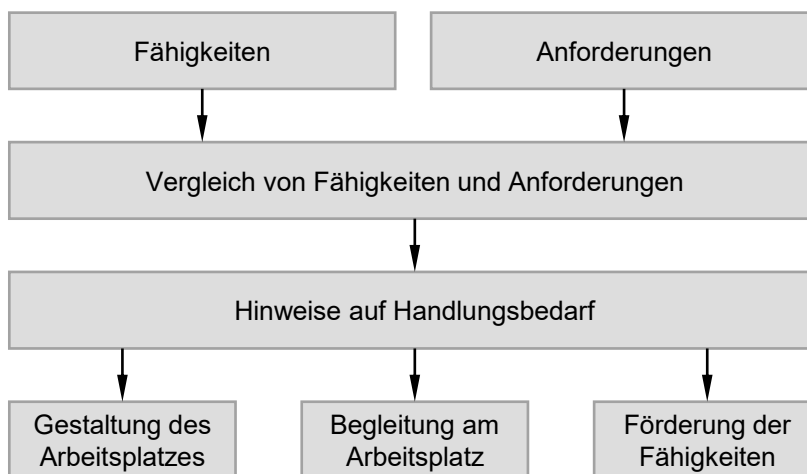
Auf der Ebene der *speziellen Screening-Verfahren* erfasst und bewertet der Methoden-anwender die Arbeitsplätze mithilfe von Formblättern, die er händisch oder digital in MS Excel für die jeweilige Belastungsart ausfüllt [vgl. BAUA19, S. 122-234]. Die *Methoden des Experten-Screenings* fassen die unterschiedlichen Belastungsarten unter Berücksichtigung der Belastungshöhe und -dauer zu einer Risikobewertung zusammen [vgl. BRUD20, S. 5-7]. Eine Aufnahme der Prozesse mit dem Messsystem *CUELA* und weiteren, von der Belastungsart abhängigen, Sensoren ermöglicht eine Anwendung der Methoden in der Methodenebene *Messtechnische Analyse* [vgl. WEBE20, S. 8-39]. Durch eine weitere Kopplung des Messsystems *CUELA* mit dem biomechanischen Simulationswerkzeug *Der Dortmunder* wurden die LMM auf der Methodenebene *Labormessungen/Simulationen* evaluiert [vgl. JÄGE20, S. 14-216].

Die Stärken der Leitmerkmalmethoden liegen in ihrer breiten Anwendung, die sowohl eine Aufnahme und Bewertung unterschiedlicher Belastungsarten ermöglicht als auch eine Detaillierung der Analyse über die verschiedenen Methodenebenen. Nachteilig ist zum einen, dass nur ein Gesamtwert für den Arbeitsplatz gebildet wird, der aussagt, wie dringlich ergonomische Maßnahmen sind. Eine Zuordnung der Bewertung zu den Körperbereichen, die eine gezielte Maßnahmenableitung erleichtern würde, wurde bisher nur exemplarisch entwickelt [vgl. BAUA19, S. 739-753; BRUD20, S. 44-46]. Zum anderen sehen die LMM keine Erfassung der individuellen Fähigkeiten und Berücksichtigung individueller Einschränkungen vor.

### **2.3.4 Integration von Menschen mit Behinderungen in die Arbeitswelt – IMBA**

Das Verfahren *Integration von Menschen mit Behinderung in die Arbeitswelt* ist ein Profilvergleichssystem, das den Vergleich von beruflichen Anforderungen und den individuellen Fähigkeiten einer Person ermöglicht. Es ist demnach kein direktes Screening-Verfahren, sondern greift die Ergebnisse von Fähigkeits- und Anforderungsanalysen auf, um sie einander gegenüberzustellen und einen Handlungsbedarf abzuleiten (vgl. Abbildung 2-8). IMBA ist dabei branchenunabhängig in der beruflichen Prävention, Rehabilitation und Eingliederung einsetzbar und fokussiert insbesondere, jedoch nicht ausschließlich, ältere und behinderte Menschen [ALLE04, S. 269; IQPR00, S. 3-7].

IMBA dokumentiert die arbeitsbezogenen Fähigkeiten und Anforderungen in einem generischen Itemkatalog. Dieser umfasst 70 Hauptmerkmale und 108 optionale Detailmerkmale, die auf einer sechs-stufigen oder dichotomen (ja/nein) Skala bewertet werden. Die Merkmale sind insgesamt neun Dimensionen (z. B. Körperhaltung) zugeordnet und beschreiben gleichermaßen die Fähigkeit des Mitarbeiters und die Anforderung des Arbeitsplatzes. Zur Bewertung der Merkmalsausprägung gibt das Verfahren keine explizite Methode vor. Es ist zwar möglich, die Daten aus Quellen wie der Aktenlage, Beobachtung oder Tests zu ermitteln, jedoch ist es empfehlenswert, standardisierte Verfahren zu nutzen, wie z. B. das EFL (vgl. Abschnitt 2.2.4) oder ERGOS (vgl. Abschnitt 2.2.5) für die Fähigkeiten oder die Leitmerkmalmethoden für die Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Die zugehörige Software „MARIE“ unterstützt den Anwender beim Profilvergleich [MOZD13, S. 57-59].



**Abbildung 2-8: Vorgehen beim IMBA-Verfahren in Anlehnung an [IQPR00, S. 4]**

Das IMBA-Verfahren eignet sich demnach prinzipiell, um die Mitarbeiterfähigkeiten bei der ergonomischen Analyse der Arbeitsplätze über den Profilvergleich einzubeziehen. Über die Vielzahl an Merkmalen sind die Profile zwar sehr breit gefasst, jedoch sind die Skalenwerte für die einzelnen Merkmale nur grob definiert. Die Anwendung des Verfahrens erfordert geschultes Personal. Zum einen erfordert die Erstellung des Fähigkeitsprofils ein hohes Maß an medizinischem Fachwissen und die Erstellung des Anforderungsprofils ein hohes Maß an technischem Verständnis. Zum anderen gibt der Profilvergleich lediglich Hinweise auf Handlungsbedarfe bezüglich einzelner Merkmale, über die der Anwender im Einzelfall entscheidet [IQPR00, S. 15].

### 2.4 Digitale Menschmodelle und Motion Capture

Dieser Abschnitt beschreibt mit digitalen Menschmodellen und Motion Capture zwei wichtige Werkzeuge zur computergestützten ergonomischen Analyse. Abschnitt 2.4.1

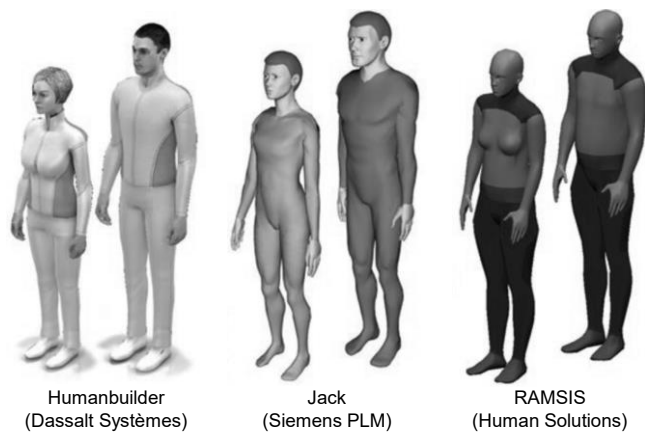
gibt einen Überblick über DMM und Abschnitt 2.4.2 zeigt auf, wie ein Anwender die Eigenschaften der DMM verändern kann. Anschließend geht Abschnitt 2.4.3 auf Motion-Capture-Technologien ein und Abschnitt 2.4.4 stellt das in dieser Arbeit verwendete Motion-Capture-System vor. Zum Abschluss zeigt Abschnitt 2.4.5, wie diese Technologien bereits zur Erfassung von Mitarbeiterfähigkeiten und der Arbeitsplatzbelastung genutzt werden.

### 2.4.1 Digitale Menschmodelle

Digitale Menschmodelle bilden die Geometrie und weitere Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen digital ab. Im Kontext der Arbeitswissenschaft sind sie softwareseitige Werkzeuge für die Produkt- und Prozessgestaltung und bilden die Grundlage für digitale Ergonomieanalysen [MÜHL16a, S. 73-74]. Sie haben ihre Ursprünge in der Innengestaltung von Fahrzeugen und die ersten DMM sind im Zuge der Digitalisierung von 2D-Zeichenschablonen wie der der Kieler Puppe entstanden. Auch ihre Anwendung zur Bewertung existierender und zukünftiger Arbeitsplätze fokussiert nach wie vor die Automobilindustrie, aber auch die Flugzeugindustrie und Bereiche des Maschinenbaus mit Serienmontage [VDI4499, S. 7, S. 12–13; MÜHL16b, S. 44-45].

DMM besitzen vier Grundeigenschaften, um geometrische Analysen zu ermöglichen. Das *Skelett* bildet die Grundstruktur durch mit Gelenken verbundene Liniensegmente, die sich am Menschen orientiert. Insbesondere im Bereich der Wirbelsäule ist die Anzahl der Kopplungen im Vergleich zum realen Menschen jedoch reduziert. Ein geometrisches Flächenmodell stellt die *Hautoberfläche* dar, um Körperhaltungen nachvollziehen zu können. Hierzu ist das Flächenmodell an das Skelett gekoppelt und bewegt sich mit diesem. *Anthropometrische Abhängigkeiten* geben z. B. die geometrischen Abhängigkeiten zwischen Knochenlängen vor und bestimmen so die Dimensionen des Skeletts und der Hautoberfläche. Die letzte Grundeigenschaft bilden die *Körpermaßdaten*, die häufig auf Basis von Perzentilen einer Population erzeugt werden. Auf Grundlage der anthropometrischen Abhängigkeiten ist es möglich, ein Menschmodell mit einer reduzierten Menge von Körpermaßen zu parametrisieren [VDI4499, S. 18-19].

Abbildung 2-9 zeigt Beispiele wichtiger digitaler Menschmodelle, die in der Arbeitswissenschaft zum Einsatz kommen. Sie sind in der Industrie verbreitet und Unternehmen nutzen sie, um die Ergonomie ihrer Arbeitsprozesse und Produkte zu analysieren und zu gestalten. In den zugehörigen Software-Systemen sind bereits verschiedene ergonomische Screening-Verfahren integriert, wie zum Beispiel das RULA. Sie ermöglichen zwar standardisierte ergonomische Bewertungen, erfordern aber ergonomisches Hintergrundwissen und einen hohen Zeitaufwand bei der Bearbeitung [vgl. MÜHL16a, S. 74-77].



**Abbildung 2-9: Wichtige arbeitswissenschaftliche Menschmodelle in Anlehnung an [MÜHL16a, S. 75]**

### 2.4.2 Manipulationsfunktionen digitaler Menschmodelle

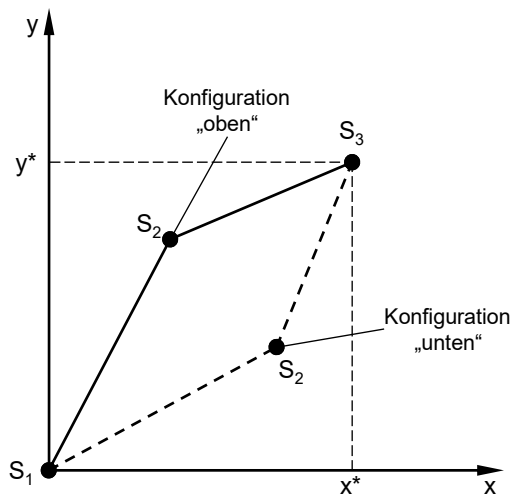
Manipulationsfunktionen bieten die Möglichkeit, die Gelenke, die Position und weitere Eigenschaften des Menschmodells einzustellen. Im Bereich der Ergonomie ist insbesondere die Einstellung der Gelenke und damit der Körperhaltung von Bedeutung. Hier stehen mit der *direkten Kinematik* (auch: Vorwärtskinematik) und der *inversen Kinematik* zwei Verfahren aus der Robotik zur Verfügung. Außerdem lassen sich Körperhaltungen mithilfe von *Bibliotheken* einstellen [MÜHL16a, S. 84; vgl. MARE20, S. 20].

Das einfachste Verfahren ist die *direkte Kinematik*, bei der ein Anwender den einzelnen Gelenken des DMM einen Gelenkwinkel zuordnet, um eine Körperhaltung einzustellen. Ein Gelenk besitzt einen (z. B. Knie), zwei (z. B. Handgelenk) oder drei Freiheitsgrade (z. B. Schulter), die der Anwender per Eingabedialog oder mit dem Mauszeiger einstellt [MÜHL16a, S. 83-84]. Über die Gelenkwinkel lässt sich die notwendige Lage (Position und Orientierung) der einzelnen Körpersegmente berechnen [MARE20, S. 41]. Mit Motion-Capture-Technologien (siehe Abschnitt 2.4.3) aufgenommene Bewegungen werden i. d. R. mittels direkter Kinematik auf DMM übertragen.

Ziel der *inversen Kinematik* ist es, die Gelenkvariablen zu berechnen, mit denen sich die gewünschte Lage eines Körpersegments einstellt. Bei der Suche einer Lösung stellt sich ein nichtlineares Gleichungssystem ein, dessen Lösung, falls existent, in der Regel nicht eindeutig ist. Um diese Gleichungssysteme zu lösen, ist bei DMM aufgrund der vielen Freiheitsgrade der Einsatz von heuristischen Methoden üblich, wie z. B. CCD [WANG91] oder FABRIK [ARIS11].

Die Problematik lässt sich vereinfacht an einer kinematischen Kette aus zwei Stäben, die sich ausschließlich in der x-y-Ebene bewegen, nachvollziehen (vgl. Abbildung 2-10). Um

die Endeffektorposition  $S_3(x^*, y^*)$  zu erreichen, ist sowohl die Konfiguration „oben“ als auch die Konfiguration „unten“ möglich [vgl. MARE20, S. 131-133]. Übertragen auf das DMM, stellt eine inverse Kinematik unter Berücksichtigung anatomischer Restriktionen alle Gelenke so ein, dass z. B. die Hände eine geforderte Lage erreichen.



**Abbildung 2-10: Vereinfachtes Beispiel der Inversen Kinematik in Anlehnung an [MARE20, S. 131]**

Außerdem ist es möglich, *Bibliotheken* zu verwenden, um bestimmte Körperhaltungen einzustellen. Statische Bibliotheken sind eine Sammlung nicht veränderbarer Körperhaltungen (z. B. Sitzen oder Hocken), die der Anwender auf ein DMM mittels direkter Kinematik überträgt und anschließend auf die genauen Gegebenheiten manuell anpasst. Parametrisierte Bibliotheken umfassen Körperhaltungen, die über mindestens einen Parameter zu beeinflussen sind. Beispielsweise kann der Anwender den Abstand zwischen Becken und Füßen beim Sitzen vorgeben und die parametrisierte Bibliothek stellt die Gelenke entsprechend ein [MÜHL16a, S. 85-86].

### 2.4.3 Motion-Capture-Technologien

Verschiedene Wirkprinzipien ermöglichen es, Bewegungen zu erkennen und zu digitalisieren. Allgemein verfolgen sie das Ziel, wesentliche Punkte eines Objekts zu erfassen, das sich in Bewegung befindet. Diese Punkte sind i. d. R. Drehpunkte oder Verbindungen zwischen starren Körpern des Objekts. Um die Bewegungen eines Menschen aufzunehmen, erfassen Motion-Capture-Systeme demnach die Gelenke und/oder verbindenden Körpersegmente [MENA11, S. 2]. Die wichtigsten Motion-Capture-Technologien für die Bewegungserfassung beim Menschen sind *optische*, *elektromagnetische* und *elektromechanische Systeme* [vgl. MENA11, S. 16-37].

*Optische Systeme* sind grob in zwei Kategorien zu unterteilen: *Markerbasierte Systeme* erfassen die Bewegungen, indem eine Lichtquelle am Körper befestigte passive Marker anstrahlt. Über die Reflektion des Lichts bestimmen Kameras die Position der einzelnen Marker. Aktive Marker senden selbst ein Signal, das von Kameras aufgefangen wird [MENA11, S. 17–21]. Bei *markerlosen Systemen* reflektiert der Körper i. d. R. ein Infrarotsignal und die Kamera bestimmt hieraus die Position [MENN11]. Die Vorteile der optischen Systeme liegen in der hohen Genauigkeit (markerbasiertes Tracking) bzw. in der einfachen Anwendung (markerloses Tracking), jedoch sind sie im industriellen Einsatz bislang aufgrund von Verdeckungsproblemen und/oder einem hohen Kalibrierungsaufwand nur bedingt einsetzbar.

*Elektromagnetische Systeme* nutzen Magnetfelder, um Bewegungen zu erfassen. Die Empfänger werden bei dieser Methode am Körper platziert und der Sender spannt ein Magnetfeld auf. Über die Messung des Magnetfelds lässt sich die Position der einzelnen Empfänger bestimmen. Verdeckung stellt bei diesen Sensoren kein Problem dar, jedoch limitiert der kleine Aufnahmebereich und die Anfälligkeit in metallischen Umgebungen den Einsatz in der Industrie [MENA11, S. 26-28].

*Elektromechanische Systeme* sind bei der menschlichen Bewegungserfassung Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme (MEMS), die als Inertialsensoren die Translations- und Rotationsbeschleunigungen messen. Sie werden an den einzelnen Körperteilen platziert, um die Körperhaltung aufzunehmen. Häufig ergänzen elektromagnetische Sensoren die Inertialsensoren, um eine genauere Messung der globalen Position zu ermöglichen. Diese Systeme haben mehrere Vorteile: Die Sensoren haben keine Verdeckungsprobleme, sind portabel und erfordern keine aufwendige Kalibrierung. Die Nachteile liegen vor allem im Drift der Sensoren, da die Positionsdaten mittels zweifacher Integration über die Zeit aus der gemessenen Beschleunigung bestimmt werden. Außerdem können metallische Umgebungen aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit haben [MENA11, S. 28-30].

Das in dieser Arbeit verwendete Motion-Capture-System gehört zur Gruppe der elektromechanischen Systeme und wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

#### **2.4.4 Das verwendete Motion-Capture-System XSens MTw Awinda**

Der *XSens MVN Awinda* ist ein Motion-Tracking-Anzug, der sich aus 17 wireless Motion Trackern (MTw) zusammensetzt. Die MTws sind mit einem T-Shirt, einem Stirnband und mehreren Klettbandern an definierten Körperstellen angebracht (vgl. Abbildung 2-11). Die zugehörige Software *MVN Analyze* ermittelt aus den Sensordaten u. a. die Rotationen und Positionen von insgesamt 23 Körpersegmenten. Der Export in verschiedenen Datenformaten ermöglicht eine tiefere Analyse der kinematischen Daten.



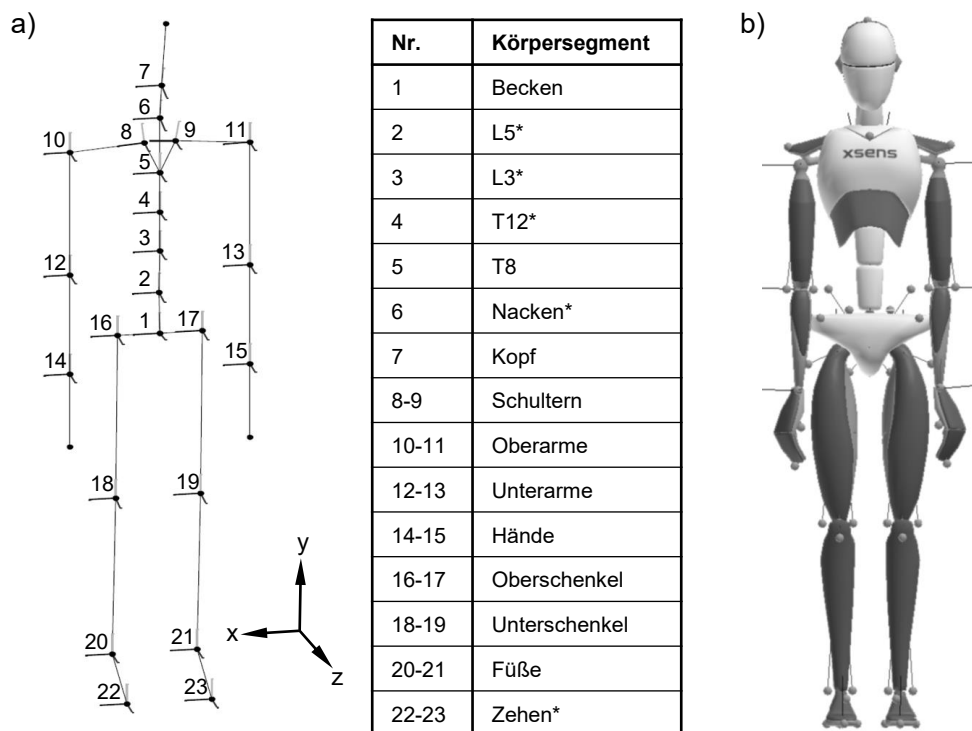
**Abbildung 2-11: Das Motion-Capture-System XSens MVN Awinda [XSEN22] mit 17 wireless Motion Trackern (MTw) [PAUL18, S. 2]**

Jeder MTw besteht aus zwei MEMS-Intertialsensoren in Form eines 3D-Gyroskops und eines 3D-Beschleunigungssensors, die um ein 3D-Magnetometer, ein Barometer und ein Thermometer ergänzt werden. Das Gyroskop misst die Winkelgeschwindigkeit, die bei einfacher Integration über die Zeit die relative Winkeländerung ergibt und der Beschleunigungssensor misst die lineare Beschleunigung, welche über eine zweifache Integration über die Zeit zur relativen Positionsänderung führt. Da sich bei der Integration der Sensordaten Signalfehler kumulieren, entsteht sogenannter Sensor-Drift, d. h. die ermittelten Werte weichen mit der Zeit immer mehr vom wahren Wert ab. Dieser Effekt wird mithilfe der anderen verbauten Sensoren minimiert, wodurch auch längere Messungen eine genaue Bewegungserfassung ermöglichen. So misst beispielsweise das Magnetometer die Stärke und Richtung umgebender Magnetfelder, welche die Messergebnisse verfälschen können [vgl. PAUL18, S. 1-3].

Die einzelnen MTw senden ihre Daten kabellos an einen Empfänger, der mit einem PC verbunden ist. Die Reichweite beträgt in Innenräumen bis zu 20 m und im Freien bis zu 50 m [XSEN19, S. 25]. Hier verarbeitet die zugehörige Software die Signale mithilfe eines hinterlegten Menschmodells zur menschlichen Bewegung. Das Menschmodell besteht aus 23 Körpersegmenten, die in Abbildung 2-12a dargestellt sind. Nicht an allen Körpersegmenten ist ein MTw angebracht. Aus diesem Grund werden die Bewegungen der Wirbelsäulensegmente L5, L3, T12 und Nacken sowie der Zehen mithilfe der umliegenden MTws und einem hinterlegten biomechanischem Modell berechnet. Um das biomechanische Modell zu skalieren, sind mehrere anthropometrische Maße einzugeben, mindestens jedoch die Körpergröße und Fußlänge. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt

durch ein kurzes Verharren in der neutralen N-Pose (vgl. Abbildung 2-12b) und anschließendes Hin- und Zurückgehen einer Wegstrecke von wenigen Metern [SCHE18, S. 3-4].

Das Motion-Capture-System erfasst die kinematischen Daten der Körpersegmente mit einer maximalen Frequenz von 60 Hz. Mit einer Abweichung bei der Messung ergonomischer Gelenkwinkel von unter  $5^\circ$  gegenüber optoelektronischen Systemen erzielt es dabei eine hohe Genauigkeit [ROBE17, S. 617; SCHE18, S. 7]. Über die kabellose Datenübertragung und die vergleichsweise kleinen Sensoren schränken sie den Mitarbeiter während des Arbeitsprozesses kaum ein. Daher eignet sich das Motion-Capture-System für Ergonomieanalysen im Produktionsumfeld, weshalb auch kommerzielle Ergonomie-Software eine Einbindung der Hardware unterstützt [z. B. VIVE22]. Neben den genannten Vorteilen hat das System gegenüber anderen Motion-Capture-Systemen jedoch auch Nachteile: Zum einen ist zu beachten, dass die Positionsmessung trotz der Korrekturalgorithmen bei längeren Aufnahmen fehlerbehaftet ist. Zum anderen sind das Anlegen der Sensoren und das Vermessen des Körpers mit Zeitaufwand verbunden, der z. B. bei markerlosem optischen Tracking entfällt.



**Abbildung 2-12: Das hinterlegt Menschmodell: a) Die Körpersegmente des Menschmodells in Anlehnung an [XSEN19, S. 140]. Die Nummerierung verweist auf das Ursprungsgelenk des jeweiligen Körpersegments. An Körpersegmenten mit einem \* ist kein MTw angebracht und ihre Bewegung wird mit den verbundenen Körpersegmenten und einem biomechanischen Modell berechnet. b) Der erzeugte Avatar in der N-Pose [SCHE18, S. 2]**

### **2.4.5 Motion-Capture-basierte Erfassung der Mitarbeiterfähigkeiten und der Arbeitsplatzbelastung**

Die Erfassung von Bewegungsdaten zur ergonomischen Analyse von Körperhaltungen mittels Motion-Capture-Systemen ist insbesondere im Bereich der Arbeitsplatzanalysen bekannt. Wie zuvor beschrieben, existieren Software-Lösungen, die Menschmodelle zur Bewertung der Belastung am Arbeitsplatz nutzen, deren Körperhaltung mit Bewegungsdaten eingestellt werden kann. Beispielsweise unterstützt die Software des verwendeten Motion-Capture-Systems den Daten-Stream zu Siemens Jack. Forschungsseitig liegt der Fokus insbesondere auf der Nutzung kamerabasierter Motion-Capture-Systeme (z. B. *Microsoft Kinect V2*), die bestehende Methoden kostengünstig automatisieren sollen, z. B. das RULA [z. B. HAGG13; PLAN17] oder das OWAS [z. B. GUDE09; HORE13; BONI19].

Zur Erfassung von Mitarbeiterfähigkeiten existieren bisher nur wenige Forschungsansätze, die Bewegungsumfänge messen und eher dem Gebiet der medizinischen Diagnostik zuzuordnen sind [z. B. SCHM14; LEE15; ZULK17]. Bonin hat zudem die automatisierte Erfassung einzelner Kriterien bei Hebetätigkeiten des FCE-Verfahrens ELA untersucht [BONI19].

## **2.5 Forschungsdefizit**

Mit zunehmendem Stellenwert der Humanisierung von Arbeit haben sich verschiedene Methoden etabliert, um sowohl die Mitarbeiterfähigkeiten als auch die Arbeitsplatzanforderungen zu erfassen und zu bewerten. Im Zuge fortschreitender Digitalisierung existieren bereits Ansätze zur Automatisierung dieser Methoden mittels Motion Capturing (vgl. Abschnitt 2.4.5). Dennoch ergeben sich Defizite, welche die folgenden Abschnitte getrennt vorstellen. Hierbei ist leicht zu erkennen, dass die Defizite der Fähigkeitsanalysen (Abschnitt 2.5.1) zum Teil Ursache für die Defizite der Anforderungsanalysen (Abschnitt 2.5.2) sind.

### **2.5.1 Defizite bestehender Methoden zur Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit**

Damit Unternehmen die Beanspruchung des Mitarbeiters am Arbeitsplatz optimieren können, ist es notwendig, die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter zu erfassen. Hierzu haben sich Methoden verschiedener Detaillierungsgrade etabliert (vgl. Abschnitt 2.2), die jedoch mit folgenden Defiziten verbunden sind:

### D1: Fehlender Bezug zum Arbeitsplatz bei einfachen Erfassungsmethoden

Einfache Untersuchungen der körperlichen Fähigkeiten bieten die Möglichkeit, mit geringem Zeitaufwand einzelne Fähigkeiten des Mitarbeiters zu messen. Beispielsweise ist es mit einem einfachen Winkelmesser möglich, Einschränkungen in der Beweglichkeit festzustellen. Hierbei handelt es sich jedoch um isolierte Aufnahmen einzelner Fähigkeiten, denen der Bezug zum Arbeitsplatz fehlt. Besteht bei einem Mitarbeiter zum Beispiel eine Einschränkung in der Beweglichkeit der Wirbelsäule, erlaubt dies keine Aussage darüber, ob ein Mitarbeiter die Tätigkeiten an einem Arbeitsplatz ausführen kann oder nicht.

### D2: Hoher Erfassungsaufwand bei Methoden aus dem Gebiet der FCE

Methoden aus dem Gebiet der FCE ermöglichen es, die Fähigkeiten eines Mitarbeiters mit Hinblick auf die Belastungen am Arbeitsplatz zu erfassen. Diese haben mit ca. fünf Stunden jedoch einen hohen Zeitaufwand, der die Erfassung einer ganzen Belegschaft zu zeit- und somit kostenintensiv für die industrielle Anwendung macht. Aus diesem Grund kommen sie vor allem zur Feststellung der Leistungsfähigkeit nach längerer Arbeitsunfähigkeit zum Einsatz.

## **2.5.2 Defizite bestehender Methoden zur Erfassung und Bewertung physischer Belastungen am Arbeitsplatz**

Die Bewertung von Arbeitsplätzen ist im Arbeitsschutzgesetz verankert und es gibt eine Vielzahl verfügbarer Methoden, die sich im industriellen Einsatz bewährt haben (vgl. Abschnitt 2.3). Mit ihnen ist eine detaillierte Analyse der Belastungen am Arbeitsplatz möglich, jedoch ergeben sich auch hier verschiedene Defizite:

### D3: Unzureichende Berücksichtigung der individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter

Die etablierten Methoden zur Arbeitsplatzbewertung stellen keinen Bezug zu den individuellen Fähigkeiten des Mitarbeiters her. Sie beurteilen Arbeitsplätze anhand universeller Grenzwerte oder daraus abgeleiteter Körperhaltungen, ohne die Leistungsfähigkeit des Mitarbeiters zu berücksichtigen. Profilvergleichsverfahren bieten über den Abgleich von Anforderungs- und Fähigkeitsprofilen grundsätzlich die Möglichkeit, Mitarbeiter fähigkeitsgerecht einzusetzen oder Handlungsbedarfe zu identifizieren. Jedoch sind die Profilmerkmale grob gehalten, was eine sinnvolle Anwendung im betrieblichen Eingliederungsmanagement erlaubt, aber nur eine unzureichende Datenbasis für eine systematische Arbeitsplatzverbesserung bietet. Außerdem erfolgt die Profilerstellung nicht nach einer eigenen Methodik, sondern stützt sich auf die bestehenden Ansätze inklusive der mit ihnen verbundenen Defizite. Es fehlt eine umfassende Methode, die sowohl die Mitarbeiterfähigkeiten als auch die Arbeitsplatzbelastung erfasst und darauf aufbauend bewertet.

### D4: Maßnahmenableitung erfordert ein hohes Maß an ergonomischem Verständnis

Das Ergebnis einer ergonomischen Arbeitsplatzbewertung ist bei den etablierten Screening-Verfahren ein Punktwert, der das Risiko beschreibt, eine Muskel-Skelett-Erkrankung zu erleiden. Je nach Methode bezieht sich dieser Wert auf eine spezifische Körperhaltung oder auf den gesamten Arbeitsplatz. Folglich ist es mit dem Ergebnis lediglich möglich, eine Aussage darüber zu treffen, wie dringlich eine ergonomische Maßnahme ist. Die ergonomische Intervention erfolgt jedoch entkoppelt von den Analyseergebnissen mit Ausnahme vereinzelter Forschungsarbeiten, die ein entsprechendes Vorgehen für existierende Screening-Verfahren exemplarisch entwickelt haben [z. B. BRAN16]. Dies führt dazu, dass die Arbeitsplatzverbesserung ein hohes Maß an ergonomischem Verständnis erfordert. Die Mitarbeiter müssen für eine erfolgreiche ergonomische Intervention zunächst die ungünstigen Bewegungen erkennen und anschließend eine Lösung finden, die eine Gefährdung vermeidet oder verringert. Gleichzeitig verfügen die zuständigen Mitarbeiter, in der Regel Ingenieure, über wenig ergonomisches Fachwissen. Charland leitet hieraus ab, dass die Zukunft virtueller Ergonomie darin liegt, den Mitarbeiter in der Entscheidungsfindung zu unterstützen, um sichere Arbeitsplätze unabhängig von ihrem ergonomischen Vorwissen zu gestalten [CHAR16, S. 282].

### D5: Fehlende Berücksichtigung der individuellen anthropometrischen Daten

Neben den individuellen Fähigkeiten berücksichtigen bestehende Methoden auch die individuellen anthropometrischen Daten der aktiven Belegschaft nur unzulänglich. Die Bewertung der physischen Belastung am Arbeitsplatz erfolgt im Normalfall sowohl bei konventionellen Erfassungsmethoden als auch bei der Erfassung mit Motion-Capture-Systemen anhand eines oder weniger Mitarbeiter. Die Bewertung jedes Mitarbeiters an jedem Arbeitsplatz ist auch hier zu zeit- und kostenintensiv. Der Bewegungsablauf hängt jedoch maßgeblich von den Körpermaßen des untersuchten Mitarbeiters ab. Beispielsweise fällt es einem großen Mitarbeiter leichter als einem kleinen Mitarbeiter, Material aus einem hohen Regal zu entnehmen, da die Bewegung eine geringere Bewegung in der Schulter erfordert. Ist der Arbeitsraum hingegen eng oder die Arbeitshöhe tief, sind die Arbeitsbedingungen für einen kleinen Mitarbeiter ergonomisch günstiger als für große Mitarbeiter. Demnach ist die Arbeitsplatzbewertung für einen Mitarbeiter nur bedingt auf die weitere Belegschaft zu übertragen. DMM erlauben es zwar, individuelle anthropometrische Daten bei der Ergonomieanalyse zu berücksichtigen. Sie nutzen in der Regel die Perzentile hinterlegter länderspezifischer Nutzerpopulationen, die nicht der aktiven Belegschaft entsprechen. Zudem beruhen die Bewertungen auf simulierten Bewegungsabläufen aus der Arbeitsgestaltung, die ein digitales Abbild der Produktion erfordern. Sie erzeugen zwar realistische Bewegungen, spiegeln aber nur bedingt die Realität am Arbeitsplatz wider.

Beispielsweise berücksichtigen Simulationen keine ergonomisch ungünstigen Verhaltensweisen am Arbeitsplatz, wie zum Beispiel die Nichtnutzung von Hilfsmitteln zur Lastreduktion.

### 3 Lösungskonzept

Dieses Kapitel stellt das Lösungskonzept für die Ergonomieanalyse vor. Hierzu beginnt das Kapitel mit einer Situationsanalyse (Abschnitt 3.1). Abschnitt 3.2 definiert Anforderungen an das Lösungskonzept, das in Abschnitt 3.3 ausführlich beschrieben wird. Das Lösungskonzept unterteilt sich in die Fähigkeitsanalyse, die Arbeitsplatzanalyse und die Bewegungstransformation.

#### 3.1 Situationsanalyse

Die folgende Situationsanalyse grenzt den Fokus dieser Arbeit ein und systematisiert die zu erwartenden Bewegungsabläufe und Belastungen. Die entwickelte Methode ist zwar theoretisch in allen Bereichen anwendbar, in denen manuelle Arbeitsprozesse vorzufinden sind. Der Fokus in der Entwicklung lag jedoch auf Montage- und Logistikprozessen und den entsprechenden Belastungen, die auf den Mitarbeiter wirken. Im Folgenden werden daher zunächst die Begriffe *Montage* und *Logistik* für diese Arbeit definiert, um anschließend die erwarteten Bewegungen und Belastungen am Arbeitsplatz zu bestimmen.

*Montage* umfasst die Gesamtheit aller Vorgänge für den Zusammenbau von Körpern mit geometrisch bestimmter Form [VDI2860], d. h. ihre Aufgabe ist es, aus einer Vielzahl an Einzelteilen ein Produkt höherer Komplexität herzustellen [WARN75, S. 11]. Hierbei übt die Montage folgende Funktionen aus [LOTT12, S. 2]:

- Fügen (z. B. Zusammensetzen, Kleben)
- Handhaben (z. B. Bewegen, Sichern)
- Kontrollieren (z. B. Prüfen, Messen)
- Justieren (z. B. Justieren durch Trennen oder Einstellen)
- Sonderoperationen (z. B. Markieren, Reinigen)

Typisch für die Montage ist ein geringer Automatisierungsgrad und somit ein hoher Anteil an manueller Arbeit [HEHE11, S. 32]. Dementsprechend fokussiert diese Arbeit die manuelle Montage und die Belastungen, die typischerweise bei der Ausführung der o. g. Tätigkeiten auftreten.

*Logistik* hat zum Ziel, die richtigen Produkte in der richtigen Menge, Zusammensetzung und Qualität zum richtigen Zeitpunkt zu minimalen Kosten bereitzustellen [PFOH18, S. 12; WIEN19, S. 243]. Hierbei führt sie die folgenden Funktionen durch [WIEN19, S. 243]:

- Lagern
- Transportieren
- Handhaben

- Verteilen
- Kommissionieren
- Verpacken

Diese Arbeit betrachtet den Menschen im Arbeitssystem und fokussiert somit die manuellen Logistikprozesse. Dementsprechend liegt der Fokus auf den Grundfunktionen *Transportieren, Handhaben, Kommissionieren* und *Verpacken*.

Vergleicht man die Funktionen der Montage und der Logistik, fällt auf, dass sie grundlegend ähnliche manuelle Tätigkeiten abbilden. In der Praxis üben Montagemitarbeiter zudem häufig auch Logistikfunktionen aus und vice versa. Beispielsweise ist es in der Praxis üblich, dass ein montiertes Bauteil am Ende der Montagelinie verpackt wird, bevor der Weitertransport erfolgt. Demnach ist eine grundlegende Unterscheidung der beiden Prozessarten im weiteren Verlauf der Arbeit nicht erforderlich, auch wenn die Methode bezüglich beider Anwendungsfälle zu testen ist.

Die Funktionen der Montage und Logistik zeigen zudem auf, welche Belastungen am Arbeitsplatz zu erwarten sind. In der Systematik des Arbeitssystemmodells (vgl. Abbildung 2-1) erfordern die Tätigkeiten, dass ein Mitarbeiter Körperhaltungen zur Bewältigung der Arbeitsaufgabe einnimmt. Hierbei sind sowohl dynamische als auch statische Belastungen des Muskel-Skelett-Systems zu erwarten. Zusätzlich erfolgt eine Belastung durch das Lastgewicht der Arbeitsmittel, mit denen der Mitarbeiter interagiert.

Um die Belastungssituation an einem Arbeitsplatz gezielt erfassen zu können, ist zunächst ein typischer Bewegungsablauf zu definieren. Für die Montage, aber auch für die in dieser Arbeit betrachteten Logistikprozesse, liefert hierzu das MTM-1-Verfahren (MTM: Methods-Time Measurement) eine theoretische Grundlage. Das Verfahren teilt einen Arbeitsablauf in Grundbewegungen, um ihn zu beschreiben und seinen Zeitbedarf anhand von Normzeitwerten abzuleiten. Die Grundbewegungen setzen sich aus Bewegungen des Hand-Arm-Systems, den Blickfunktionen und Körper-, Bein- und Fußbewegungen zusammen, die ein Mitarbeiter bei der Erfüllung der Arbeitsaufgabe ausübt. Das MTM-1-Verfahren dient zur Analyse von Prozessen der Mengenfertigung. Zur Analyse von Serien- und Einzelfertigung gibt es das UAS- bzw. MEK-Verfahren, die auf MTM-1 basieren und dieselben Grundbewegungen in komplexeren Prozessbausteinen zusammenfassen [BOKR12, S. 99-100]. Eine Verallgemeinerung über die unterschiedlichen Fertigungsarten ist somit problemlos möglich.

Abbildung 3-1 zeigt die einzelnen Grundbewegungen und ihre Unterkategorien. Ziel ist es, die zu erfassenden Zielregionen für die Fähigkeits- und Arbeitsplatzanalyse zu bestimmen.

#### Bewegungen des Hand-Arm-Systems

Bewegungen des Hand-Arm-Systems lassen sich primär durch den Grundzyklus aus *Hinlangen*, *Greifen*, *Bringen*, *Fügen* und *Loslassen* beschreiben, der von den drei weiteren Grundbewegungen *Drehen*, *Drücken* und *Trennen* ergänzt wird [BOKR12, S. 408]. Ihm kommt bei der Analyse von Montageprozessen eine besondere Wichtigkeit zu, da Arbeitsvorgänge im Montagebereich bis zu 85 % aus dem Grundzyklus bestehen [LOTT12, S. 54]. Folglich sind bei der ergonomischen Analyse von Montageprozessen die Zielregionen Schultern, Oberarme, Unterarme und Hände inkl. Finger von besonderem Interesse, mit Bezug auf die Beweglichkeit folglich die Schulter-, Ellenbogen- und Handgelenke.

Liegt das Bewegungsziel außerhalb der Reichweite des Hand-Arm-Systems, verkürzen Bewegungen anderer Körperteile die Bewegungslängen (sog. *Körperhilfe*). Hierbei handelt es sich um Bewegungen des Oberkörpers, die ein Mitarbeiter parallel zum *Hinlangen* oder *Bringen* ausführt [BOKR12, S. 417-419]. Je nach Lage des Bewegungsziels ist eine Kombination aus Flexion/Extension, Lateralflexion und Rotation der Brust- und Lendenwirbelsäule notwendig (BWS/LWS). Erfordert der Bewegungsfall eine visuelle Kontrolle, ist eine entsprechende Bewegung des Kopfes durchzuführen, die mittels Flexion/Extension, Lateralflexion und/oder Rotation der Halswirbelsäule (HWS) erreicht wird.

#### Blickfunktionen:

Unter Blickfunktionen versteht das MTM-1-Verfahren die Grundbewegungen *Blickverschieben* und *Prüfen*, die das Verschieben der Blickachse in horizontale oder vertikale Richtung bzw. das Erkennen eines binär ausgeprägten Merkmals im Blickfeld beschreiben. Aus ergonomischer Sicht ist eine Blickverschiebung von über 70 Grad von Interesse, da diese eine unterstützende Kopfbewegung erfordert [BOKR12, S. 436-437]. Demnach wird auch hier die HWS zur Bewegung des Kopfes beansprucht.

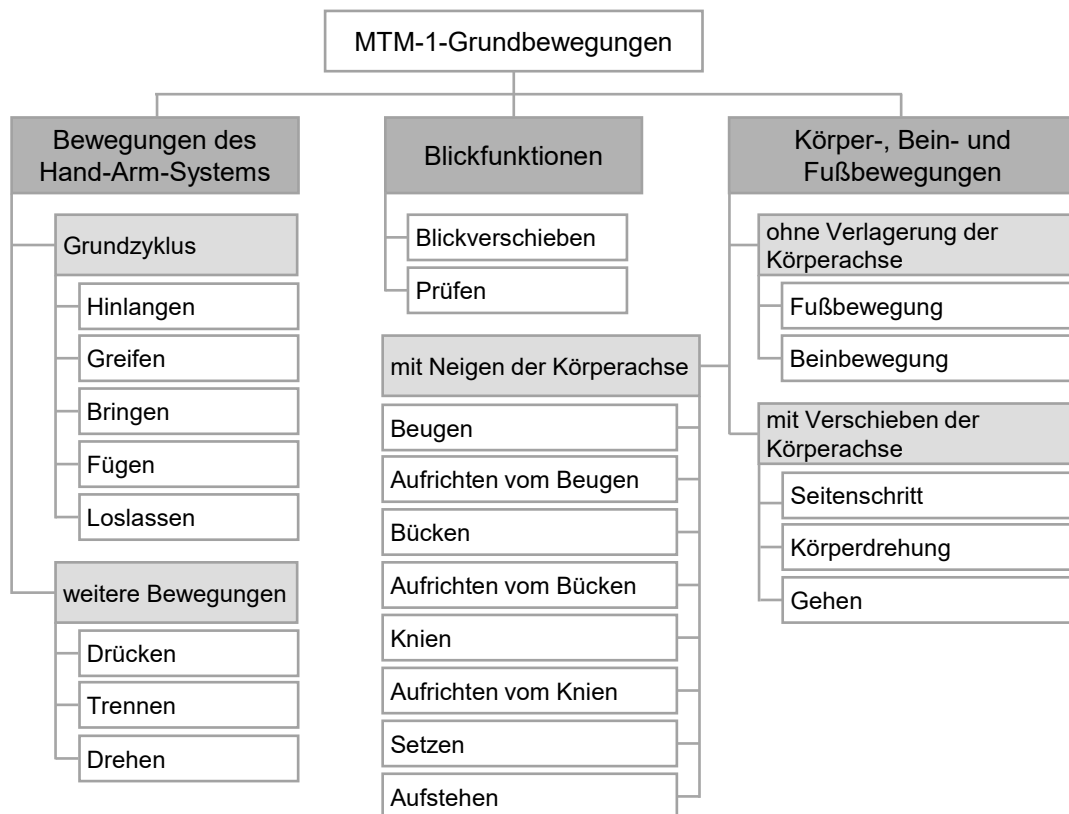
#### Körper-, Bein- und Fußbewegungen:

Die Körper-, Bein- und Fußbewegungen unterteilen sich in Bewegungen ohne Verlagerung der Körperachse (*Bein- und Fußbewegungen*), mit Verschieben der Körperachse (*Seitenschritt*, *Körperdrehung*, *Gehen*) und mit Neigen der Körperachse (*Beugen* und *Aufrichten*, *Bücken* und *Aufrichten*, *Knien* und *Aufrichten*, *Setzen* und *Aufrichten*) [BOKR12, S. 440].

Bei Bewegungen ohne Verlagerung der Körperachse führt der Mitarbeiter eine Fußbewegung mit dem Fußgelenk als Drehachse oder eine Beinbewegung mit Drehpunkt im Knie- oder Hüftgelenk durch, ohne den gesamten Körper fortzubewegen. Hierunter fallen z. B. Abstützbewegungen oder auch das Betätigen eines Pedals [vgl. BOKR12, S. 441].

Körperbewegungen mit Verschieben der Körperachse erfordern ebenfalls eine Bewegung der Beine und Füße, jedoch haben sie eine Fortbewegung des Körpers zur Folge. Die Grundbewegung *Körperdrehung*, bei der ein Mitarbeiter den Oberkörper um mindestens 45 Grad nach links oder rechts dreht, erfordert zusätzlich eine Rotation der BWS/LWS [vgl. BOKR12, S. 440-441].

*Beugen, Bücken, Knien* und *Setzen* und das anschließende Aufrichten sind Körperbewegungen mit Neigen der Körperachse. Ein Mitarbeiter führt während der Bewegung häufig Grundbewegungen des Hand-Arm-Systems aus, um an ein Bewegungsziel zu gelangen. Alle dieser Grundbewegungen involvieren eine Bewegung der gesamten Wirbelsäule, die beim Bücken und Knien zusätzliche eine Bein- und Fußbewegung erfordern [vgl. BOKR12, S. 442-444].



**Abbildung 3-1: Die Grundbewegungen bei MTM-1 in Anlehnung an [BOKR12, S. 96]**

Zusammengefasst sind zur Bewältigung einer typischen Arbeitsaufgabe die nachfolgenden Körperbereiche und Gelenke im Fokus. Da die einzelnen Bereiche der Wirbelsäule für unterschiedliche Grundbewegungen ursächlich sind, teilt diese Arbeit die Wirbelsäule in zwei Bereiche auf: die HWS und die BWS/LWS. Weiterhin ist eine nähere Betrachtung

der Füße wenig sinnvoll. Sie sind zwar Belastungen infolge von Abstütz- und Körperfortbewegungen ausgesetzt, jedoch sind diese in Bezug auf ihre Haltung und Belastung unkritisch. Demnach betrachtet die Analyse die folgenden Gelenke und Körperregionen:

- HWS
- BWS/LWS
- Schultern (links und rechts)
- Ellenbogen (links und rechts)
- Handgelenke (links und rechts)

Die in Abschnitt 2.3 vorgestellten Screening-Methoden, deren Ziel es ist, die am Arbeitsplatz auftretenden Belastungen zu erfassen und zu bewerten, bestätigen diese Zielregionen:

Das RULA (vgl. Abschnitt 2.3.2) erfasst unterschiedliche Gelenkwinkel der Schultern, des Ellenbogens, des Handgelenks, der HWS und des Rumpfes. In Bezug auf die Beine wird lediglich erfasst, ob der analysierte Mitarbeiter auf beiden Beinen mit ausgewogener Belastung steht oder nicht [vgl. MCAT93].

Die LMM (vgl. Abschnitt 2.3.3) beurteilen Arbeitsplätze hinsichtlich unterschiedlicher Belastungsarten, von denen vor allem die Belastungsarten *Heben/Halten/Tragen*, *Manuelle Arbeitsprozesse* und *Körperzwangshaltungen* an den in dieser Arbeit betrachteten Arbeitsplätzen vorkommen. Gemeinsam beanspruchen sie die Haupt-Zielregionen: Nacken/HWS, Schulter/Oberarm, Ellenbogen/Unterarm, Hände/Handgelenke, Oberer Rücken/BWS, Unterer Rücken/LWS, Hüfte/Oberschenkel, Knie, Sprunggelenk/Füße und das Herz-Kreislauf-System [BAUA19, S. 53].

Das IMBA-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.4) definiert keine expliziten Zielregionen der Analyse, sondern bildet die vom Mitarbeiter einzunehmenden Körperhaltungen und auszuführenden Bewegungen als Merkmale der Fähigkeits- und Anforderungsprofile ab. Die einzelnen Merkmale der Kategorien *Körperhaltung*, *Körperfortbewegung* und *Körperteilbewegung* entsprechen hierbei den Grundbewegungen aus MTM-1, wenn auch auf einer anderen Abstraktionsstufe [vgl. MOZD13, S. 58].

### **3.2 Anforderungen an das Lösungskonzept**

Aus den Defiziten der bestehenden Methoden (Abschnitt 2.5) ergeben sich die folgenden Anforderungen an die neue Methode mit dem Ziel, die Belastung an Montage- und Logistikarbeitsplätzen individuell zu analysieren und eine Aussage über die Beanspruchung zu treffen. Das in Abschnitt 2.4.4 beschriebene Motion-Capture-System dient als Enabler-Technologie, indem es die aufwandsarme Erfassung von Bewegungsabläufen bei einer

hohen Datenqualität ermöglicht. Es soll zur Aufnahme der Mitarbeiterfähigkeiten und Arbeitsanforderungen genutzt werden.

#### A1: Aufwandsarme Aufnahme der arbeitsbezogenen physischen Leistungsfähigkeit

Die Wirkung der Belastung auf den Mitarbeiter ist nach dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept von seinen individuellen Fähigkeiten abhängig. Daher bedarf es einer Methode, die es ermöglicht, die Fähigkeiten aller Mitarbeiter zu erfassen. Hierzu ist ein geeigneter Kompromiss aus Aussagekraft und Aufwand der Analyse zu finden. Es wird demnach nicht möglich sein, die Leistungsfähigkeit im Detail zu erfassen. Daher sind simple Erfassungsmethoden zu wählen, welche die wichtigsten Ausprägungen der physischen Leistungsfähigkeit abbilden, entkoppelt vom Arbeitsplatz aufgenommen werden können und trotzdem einen Bezug zum Arbeitsplatz zulassen.

#### A2: Berücksichtigung der individuellen Fähigkeiten bei der Arbeitsplatzbewertung

Die individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter bilden die Grundlage für eine individuelle Arbeitsplatzbewertung. Eine weitere Anforderung an die Methode ist somit die Berücksichtigung dieser Fähigkeiten bei der Arbeitsplatzbewertung. Der Status Quo nutzt allgemeingültige Grenzwerte, die für jeden Mitarbeiter gelten. Ein derartiges Vorgehen ist insbesondere im Hinblick auf eine alternde Bevölkerung und der damit verbundenen Minderung der körperlichen Leistungsfähigkeit nicht ausreichend. Die Methode soll anhand der erfassten Fähigkeiten individuelle Grenzwerte definieren, um beispielsweise individuelle Einschränkungen der Leistungsfähigkeit bei der Arbeitsplatzbewertung zu berücksichtigen.

#### A3: Hohe Detaillierung bei der Arbeitsplatzbewertung

Die Arbeitsplatzbewertung soll zudem eine hohe Detaillierung bei der Risikobewertung bieten. Nur so ist es möglich, die Belastungssituation am Arbeitsplatz aufzuzeigen, welche die Grundlage für eine gezielte Maßnahmenableitung bildet. Die Arbeitsplatzbewertung soll daher die relevanten Belastungsarten bei Montage- und Logistiktätigkeiten berücksichtigen und eine Risikobewertung für jede Körperhaltung ermöglichen. Dafür ist möglichst jede Zielregion bei jeder Bewegung bzw. jeder Körperhaltung ergonomisch zu bewerten, so dass Unternehmen die kritischen Arbeitsschritte einfach identifizieren können.

#### A4: Unterstützung bei der Ableitung ergonomischer Maßnahmen

Etablierte Screening-Verfahren enden mit einer Bewertung, die aussagt, inwieweit ergonomische Maßnahmen am Arbeitsplatz erforderlich sind. Obwohl bei den Verfahren viele

notwendige Informationen vorliegen, wie z. B. die kritischen Arbeitsschritte, die Belastungsart und die überbelasteten Körperbereiche, erfolgt keine methodische Unterstützung der Maßnahmenableitung. Ziel ist es, die Analyseergebnisse so darzustellen, dass der betroffene Körperbereich und die Belastungsart direkt ersichtlich sind. Hierauf aufbauend ist ein Vorgehen zu entwickeln, das Mitarbeiter in der Arbeitsplatzverbesserung unterstützt, ohne dass diese extensives ergonomisches Vorwissen mitbringen müssen.

### A5: Aufwandsarme Arbeitsplatzbewertung für verschiedene Körpermaße

Eine individuelle Bewertung der Arbeitsplatzbelastung ist nur sinnvoll, wenn diese auch anhand eines individuellen Arbeitsablaufs erfolgt. Weil die Aufnahme von allen Mitarbeitern an allen Arbeitsplätzen schnell zu aufwendig wird, ist eine weitere Anforderung an die Methode, eine Arbeitsplatzbewertung aufwandsarm auf verschiedene Körpermaße zu übertragen. Sie soll es im Optimalfall ermöglichen, anhand der Aufnahme lediglich eines Mitarbeiters Arbeitsplatzbewertungen für die gesamte Belegschaft zu erstellen.

### **3.3 Formulierung des Lösungskonzepts**

Zur Formulierung des Lösungskonzepts beschreibt Abschnitt 3.3.1 zunächst das Vorgehens- und Systemmodell der Analyse. Die nachfolgenden Abschnitte gehen auf die Lösungskonzepte der zuvor definierten Systeme ein: Abschnitt 3.3.2 beschreibt das Lösungskonzept der Fähigkeitsanalyse, Abschnitt 3.3.3 das Lösungskonzept der Arbeitsplatzanalyse und Abschnitt 3.3.4 das Lösungskonzept der Erzeugung individueller Bewegungsabläufe. Das Kapitel schließt mit der technischen Umsetzung des Lösungskonzepts (Abschnitt 3.3.5)

#### **3.3.1 Vorgehens- und Systemmodell der Analyse**

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, ist das Ziel der ergonomischen Gestaltung von Arbeitssystemen, die Beanspruchung des Mitarbeiters zu optimieren. Hierzu ist es notwendig, die Fähigkeiten des Mitarbeiters und die Arbeitsplatzbelastung zu erfassen, um letztendlich eine Aussage über die individuelle Beanspruchung zu treffen. Der Zielzustand einer individuellen Ergonomieanalyse umfasst daher drei unterschiedliche Bestandteile:
















- Die Mitarbeiterfähigkeiten,
- die Arbeitsplatzanforderungen und
- die individuelle Arbeitsplatzbewertung für jeden Mitarbeiter.

Die Beziehung zwischen ihnen lässt sich tabellarisch darstellen (siehe Tabelle 3-1). Die Mitarbeiterfähigkeiten sind in der ersten Spalte aufgetragen, während die aufgenomme-

### 3 Lösungskonzept

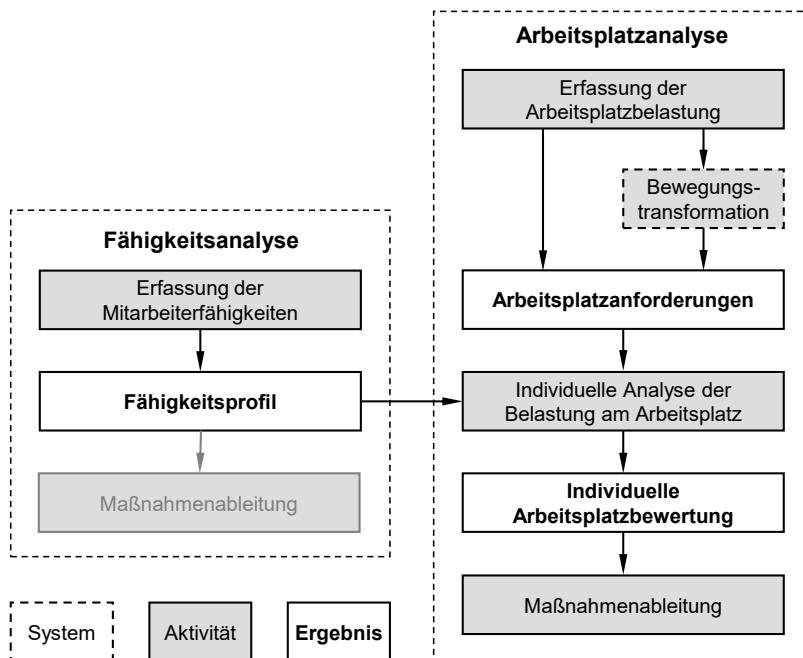
nen Arbeitsplatzanforderungen in der ersten Zeile abgebildet sind. Die individuelle Arbeitsplatzbewertung erfolgt für jeden Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz, was bei N Mitarbeitern und M Arbeitsplätzen  $N \times M$  Auswertungen ergibt. Jede Zeile aus Tabelle 3-1 enthält somit alle Arbeitsplatzbewertungen für einen Mitarbeiter und jede Spalte enthält die Bewertungen eines Arbeitsplatzes für alle Mitarbeiter.

**Tabelle 3-1: Lösungskonzept der individuellen Ergonomieanalyse**

Analyse von:	Arbeitsplatz 1 	Arbeitsplatz 2 	Arbeitsplatz 3 	...
Mitarbeiter 1 				...
Mitarbeiter 2 				...
Mitarbeiter 3 				...
...	...	...	...	...

: Mitarbeiterfähigkeiten : Arbeitsplatzanforderungen : indiv. Arbeitsplatzbewertung

Gemäß des Systems-Engineering-Ansatzes *Vom Groben zum Detail* [DAEN02, S. 30–32] stellt die Arbeit zunächst ein grobes Lösungskonzept auf, und detailliert es in den nachfolgenden Kapiteln. Abbildung 3-2 beschreibt das Ergebnis der Zielsuche und definiert drei unterschiedliche Systeme: die Fähigkeitsanalyse, die Arbeitsplatzanalyse und die Bewegungstransformation, die gleichzeitig Aktivität und Subsystem der Arbeitsplatzanalyse ist. Im SE-Vorgehensmodell sind diese somit als Detailstudien anzusehen, die jeweils einen neuen Problemlösungszyklus anstoßen [vgl. DAEN02, S. 38ff.].



**Abbildung 3-2: Vorgehens- und Systemmodell der Analyse**

Hervorzuheben ist, dass die Fähigkeitsanalyse alleine durchführbar ist, während die Arbeitsplatzanalyse die Mitarbeiterfähigkeiten für die individuelle Bewertung der Arbeitsplätze erfordert. In der Theorie können Unternehmen mit den Ergebnissen beider Teilanalysen Maßnahmen ableiten. Diese Arbeit legt den Fokus auf Maßnahmen, die auf den Arbeitsplatzbewertungen basieren. Maßnahmen zur Verbesserung der Mitarbeiterfähigkeiten sind in Abbildung 3-2 daher ausgegraut dargestellt und werden in dieser Arbeit nur am Rande behandelt.

### 3.3.2 Lösungskonzept der Fähigkeitsanalyse

Ziel der Fähigkeitsanalyse ist es, die relevanten Mitarbeiterfähigkeiten aufwandsarm zu erfassen, um eine Analyse der gesamten Belegschaft zu ermöglichen. Abbildung 3-3 zeigt das entwickelte Lösungskonzept. Es erfasst mit der Beweglichkeit und der Kraftfähigkeit die Ausprägungen der physischen Leistungsfähigkeit, die für Montage und Logistik am wichtigsten sind. Die hierbei zu erfassenden Kennwerte sind die aktiven Bewegungsumfänge, die bei der Arbeitsaufgabe beansprucht werden, und die Handgriffkraft als Indikator der globalen Muskelkraft (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Insbesondere in der Messung der Handgriffkraft spiegelt sich der notwendige Kompromiss aus Erfassungsaufwand und Aussagekraft wider: Eine Testbatterie analog zu den FCE wäre zu aufwendig, um jeden Mitarbeiter einer Belegschaft aufzunehmen. Alternativ ist auch die Erfassung mehrerer Kraftwerte denkbar, die eine genauere Aussage zum Muskelstatus zulassen.

Zur Erfassung des aktiven Bewegungsumfanges soll das Motion-Capture-System zum Einsatz kommen. Zwar wäre auch ein Einsatz eines konventionellen Winkelmessers denkbar, jedoch bietet das Motion-Capture-System mehrere Vorteile, insbesondere auch für die nachgelagerten Analyseschritte:

- Objektive, reproduzierbare Messung der ergonomischen Winkel
- Das Verwenden derselben Datenbasis ermöglicht einen Vergleich mit der Arbeitsplatzaufnahme.
- Die Erfassungssoftware erstellt aus den anthropometrischen Daten ein Menschmodell, das im Zuge der Bewegungstransformation genutzt werden kann.

In Analogie zu den Profilvergleichsmethoden ist das Ergebnis der Fähigkeitsanalyse ein Fähigkeitsprofil des Mitarbeiters, das neben Kennwerten der Beweglichkeit und Kraftfähigkeit auch die anthropometrischen Daten des Menschmodells, das Alter, das Geschlecht und das Körpergewicht umfasst.

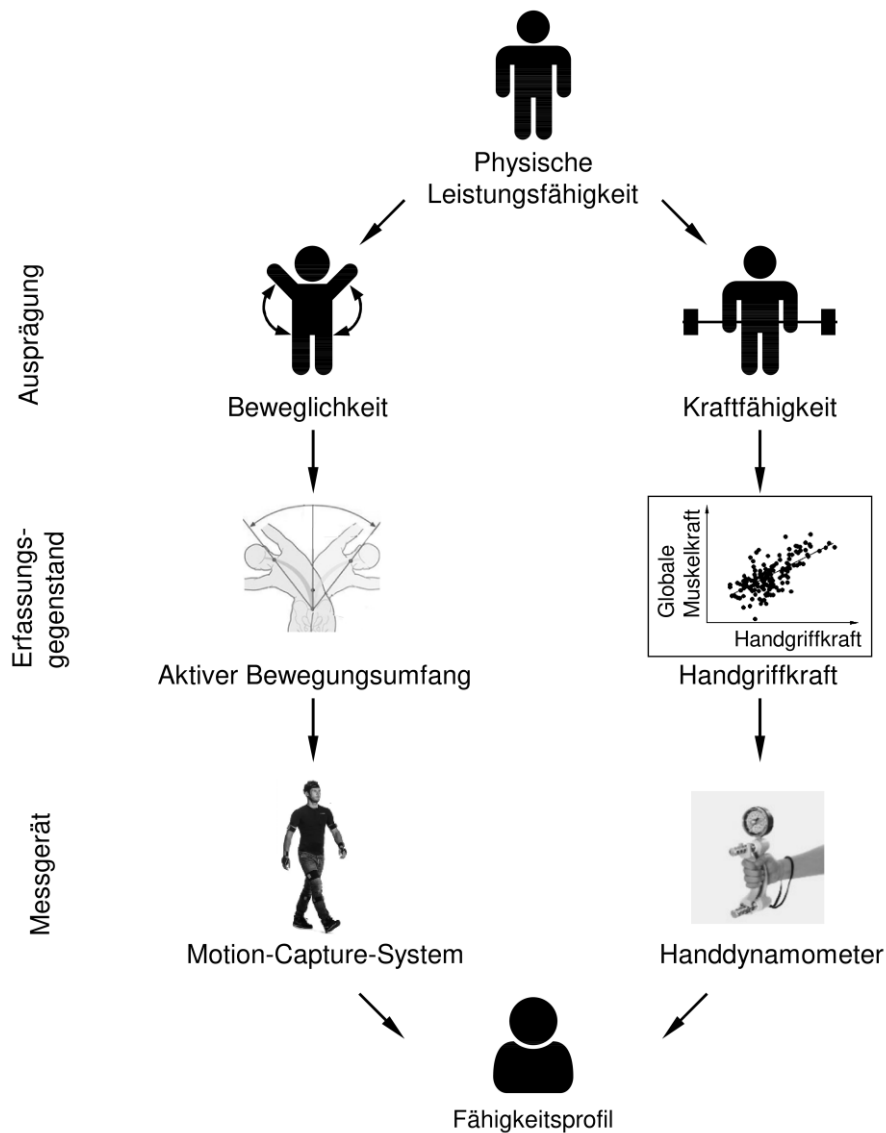


Abbildung 3-3: Lösungskonzept der Fähigkeitsanalyse in Anlehnung an [SCHÜ18; PORT19; XSEN22; SPOR23]

### 3.3.3 Lösungskonzept der Arbeitsplatzanalyse

Die Arbeitsplatzanforderungen bilden die Belastung im Arbeitssystem. Gemäß des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts ist die äußere Belastung für jeden Mitarbeiter gleich und die aufzunehmenden Arbeitsplatzanforderungen beschreiben die Teilbelastungen aus Arbeitsaufgabe und Arbeitsumgebung inklusive der Belastungshöhen und -dauern. Die Anforderungen sollen der Analyse demnach in einem mitarbeiterunabhängigen Format vorliegen. Bei der Arbeitsaufgabe umfasst dies u. a. die Materialpositionen, die bewegten Gewichte und die Dauer der jeweiligen Arbeitsschritte. Zur Aufnahme der Positionen und Zeitdauern eignet sich das Motion-Capture-System. Greift ein Mitarbeiter zum Beispiel

nach Material, ist die Materialposition mithilfe der Positionsdaten der Hand dokumentiert. Diese Daten sind um wichtige Metadaten wie die bewegten Gewichte zu ergänzen.

Abbildung 3-4 zeigt das Lösungskonzept der Arbeitsplatzanalyse ohne Bewegungstransformation. Liegen das Fähigkeitsprofil eines Mitarbeiters und die Arbeitsplatzanforderungen vor, erfolgt die Arbeitsplatzbewertung. Da dieselbe Belastung unterschiedliche Reaktionen bei den Mitarbeitern gemäß ihrer physischen Leistungsfähigkeit hervorruft, bilden allgemeingültige Grenzwerte nicht das gesamte Spektrum der Mitarbeiter ab. Individuelle Einschränkungen oder eine verminderte Leistungsfähigkeit der älteren Belegschaft werden von ihnen nur ungenügend berücksichtigt. Im Hinblick auf die Grenzwerte bei der Arbeitsplatzbewertung ist somit eine Individualisierung notwendig. Hierzu soll die Methode auf etablierte Grenzwerte zurückgreifen, die mithilfe der Fähigkeitsprofile individualisiert werden. Zum einen wurde ein solches Vorgehen gewählt, weil eine groß angelegte Ergonomiestudie den Umfang dieser Arbeit übersteigen würde. Zum anderen ist von einer besseren Akzeptanz auszugehen, wenn die Methode auf etablierten Bewertungsschemata aufbaut. Die Analyse soll die Belastung am Arbeitsplatz hinsichtlich der auftretenden Belastungsarten bewerten. Mit dem geplanten Einsatz der Methode zur Analyse manueller Montage- und Logistikprozesse sind vor allem Belastungen infolge von einzunehmenden Körperhaltungen sowie infolge von Lastenhandhabung individuell zu bewerten.

Um die Maßnahmenableitung zu unterstützen, soll die Arbeitsplatzanalyse die einzelnen Körperhaltungen fortlaufend bewerten, aber auch eine Gesamtbewertung für den Arbeitsplatz erstellen. Erfasst ein Unternehmen die Belastungen aller Arbeitsplätze, treten voraussichtlich an mehr als einem Arbeitsplatz ergonomisch ungünstige Belastungen auf. Eine Gesamtbewertung des Arbeitsplatzes befähigt Unternehmen dazu, einzelne Arbeitsplätze miteinander zu vergleichen und Verbesserungsmaßnahmen zu priorisieren. Sie soll einerseits die Zeitanteile der ergonomisch ungünstigen Haltungen berücksichtigen und andererseits aufzeigen, ob Belastungen vorliegen, die bereits bei einer geringen Wiederholungszahl zu Schädigungen des Muskel-Skelett-Systems führen können, wie zum Beispiel beim Heben hoher Lasten. In Abbildung 3-4 liegt die höchste Belastungsbewertung für den Mitarbeiter z. B. an Arbeitsplatz 2 vor, dessen Verbesserung zu priorisieren ist.

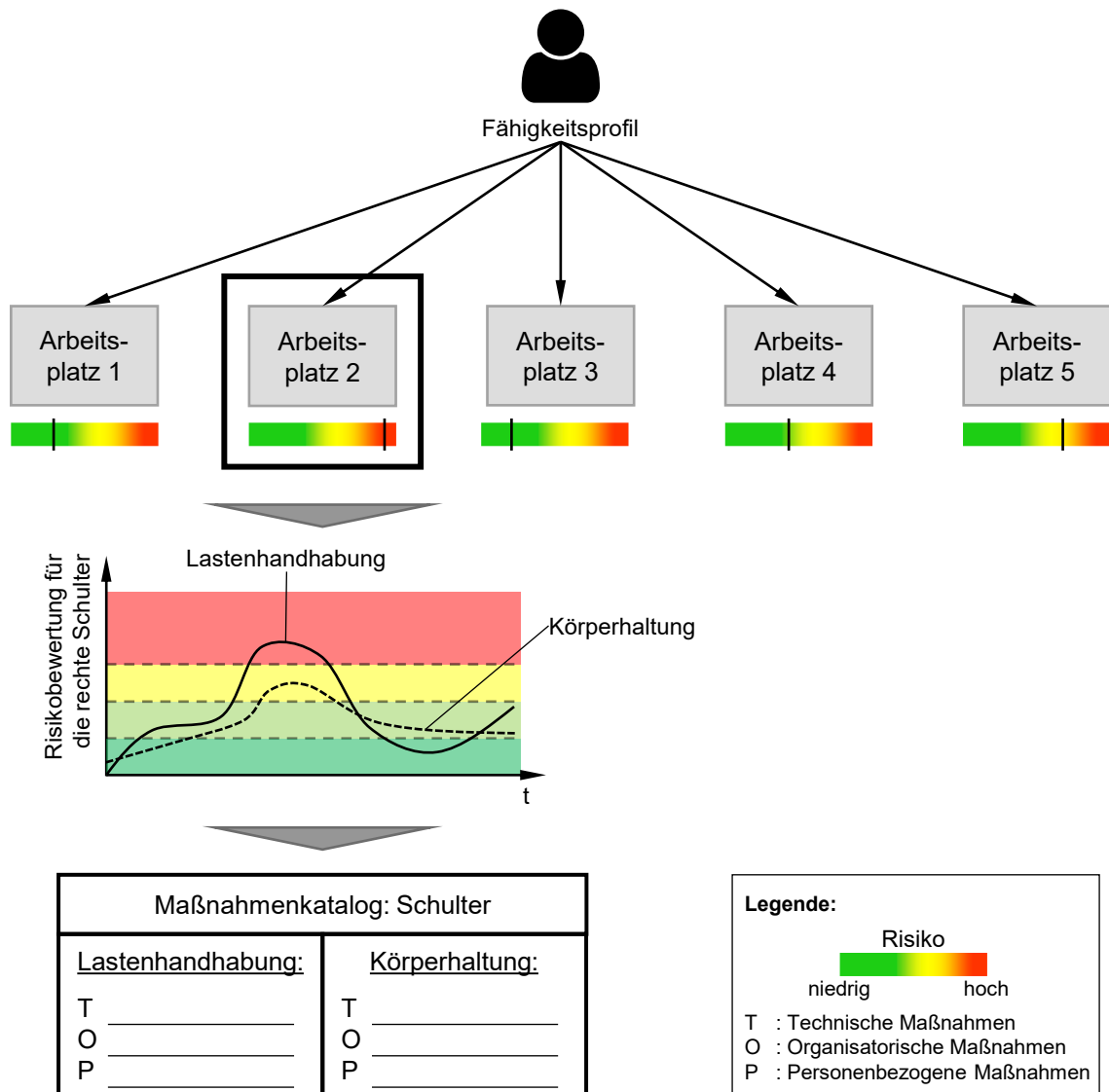


Abbildung 3-4: Lösungskonzept der Arbeitsplatzanalyse

Anschließend erfolgt eine ergonomische Intervention des priorisierten Arbeitsplatzes. Um den Mitarbeiter zu befähigen, ergonomisch kritische Arbeitsschritte erkennen zu können, soll der Arbeitsablauf fortlaufend bewertet werden. Da je nach Belastungsart und Körperregion unterschiedliche ergonomische Maßnahmen erforderlich sind, soll das Konzept die Analyseergebnisse für jede Körperregion und Belastungsart visualisieren. Eine derartige Ergebnisdarstellung zeigt dem Mitarbeiter unmittelbar auf, an welcher Körperregion eine kritische Belastung vorliegt und welcher Belastungsart sie entspricht. Abbildung 3-4 zeigt hierzu beispielhaft einen Graphen, der die Risikobewertung der rechten Schulter hinsichtlich der Lastenhandhabung und der Körperhaltung über der Zeit aufträgt. Der Verlauf der Kennlinien zeigt dem Mitarbeiter auf, welche Zeitabschnitte der

Aufnahme näher zu betrachten sind, was einen Rückschluss auf den Arbeitsschritt ermöglicht. Über die separate Bewertung der Körperbereiche ist direkt ersichtlich, wo eine ergonomische Verbesserungsmaßnahme ansetzen muss, um die Beanspruchung zu reduzieren.

Allgemein betrachtet haben ergonomische Verbesserungen bei den verschiedenen Belastungsarten ähnliche Zielzustände: Die Minimierung der auf den Körper wirkenden Kräfte, Gelenkstellungen nahe der Neutral-Null-Stellung und die Minimierung des Zeitanteils von Körperhaltungen mit hoher Belastung (vgl. Abschnitt 2.2.3). Das Konzept zur Maßnahmenableitung soll für jede Körperregion Ziele definieren und generische Maßnahmen in einem Vorschlagskatalog zusammenfassen. Erfordert der Arbeitsplatz beispielsweise hohe Gelenkwinkel der Schulter beim Greifen von Material, wäre eine einfache Maßnahme, die Materialposition zu verändern. Bei durchgängiger Anwendung kann ein solches System zudem erfolgreiche ergonomische Maßnahmen aufnehmen und für zukünftige Gestaltungsaufgaben und ergonomische Interventionen dokumentieren. So können auch Mitarbeiter ohne extensives ergonomisches Vorwissen die Analyseergebnisse zur Maßnahmenableitung nutzen. Eine geeignete Struktur für einen derartigen Maßnahmenkatalog bietet das TOP-Prinzip (vgl. Abschnitt 2.1.1).

#### **3.3.4 Lösungskonzept zur Erzeugung individueller Bewegungsabläufe**

Der Bewegungsablauf hängt maßgeblich von den individuellen Körpermaßen ab. Bei einer Greifbewegung bestimmen beispielsweise Maße wie Schulterhöhe und Armlänge die Körperhaltung, die der Mitarbeiter zur Bewältigung der Arbeitsaufgabe einnimmt. Demzufolge ist für eine individuelle Ergonomieanalyse ein individueller Bewegungsablauf für jeden Mitarbeiter aufzunehmen. Die Aufnahme aller Mitarbeiter an allen Arbeitsplätzen ist bei kleinen Produktionsbereichen noch möglich, jedoch wird ein solches Vorgehen bei vielen Mitarbeitern und Arbeitsplätzen schnell sehr aufwendig und für eine Praxisanwendung ungeeignet. So würden beispielsweise 40 Mitarbeiter und 20 Arbeitsplätze bereits 800 ( $40 * 20$ ) Arbeitsplatzaufnahmen erfordern. Für diesen Fall ist es notwendig, realitätsnahe Bewegungsabläufe entsprechend der Arbeitsplatzanforderungen automatisiert zu erstellen. Die Methode soll hierzu eine Transformation aufgezeichneter Bewegungsabläufe auf andere Körpermaße ermöglichen, die bei Bedarf den Aufnahmeaufwand reduziert. Anstelle der 800 Arbeitsplatzaufnahmen im o. g. Beispiel wäre der Aufwand mit lediglich 20 Arbeitsplatzaufnahmen, die auf andere Körpermaße übertragen werden, als gering einzustufen. Die Bewegungstransformation soll automatisch erkennen, welche Positionen und Rotationen der Körpersegmente der Arbeitsplatz vorgibt. Beispielsweise ist beim Greifen von Material von jedem Mitarbeiter dieselbe Handposition zu erreichen. Die einzelnen Bewegungsabläufe sind im Anschluss analog zu Abschnitt 3.3.3 zu bewerten.

### 3.3.5 Technische Umsetzung des Lösungskonzepts

Die Umsetzung des Lösungskonzeptes dieser Arbeit erfolgt mit Hilfe eines Software-Prototyps, der in der Game Engine *Unity* (Unity Technologies, San Francisco, USA) in der Version 2019.3 für diese Arbeit entwickelt wurde. Er verarbeitet die Informationen aus den verschiedenen Datenquellen und visualisiert die Ergebnisse der Analysen. Alle Bewegungsaufzeichnungen erfolgen mit der kommerziellen Software *MVN Analyze* (XSens, Enschede, Niederlande). Diese verarbeitet die Sensordaten, erstellt aus den Körpermaßen die DMM der Mitarbeiter und berechnet die kinematischen Daten der DMM. Zusätzlich bereitet die Software die kinematischen Daten auf, um den Sensordrift zu minimieren, was insbesondere aufgrund der metallischen Einflüsse in einer Produktionsumgebung notwendig ist (vgl. Abschnitt 2.4.3).

### 4 Fähigkeitsanalyse

Dieses Kapitel beschreibt die Fähigkeitsanalyse der entwickelten Methode. Sie hat zum Ziel, die arbeitsbezogene physische Leistungsfähigkeit aufwandsarm aufzunehmen. Sie wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Biomechanik der BG Unfallklinik Murnau entwickelt.

Abschnitt 4.1 detailliert die Anforderungen an die Analyse, die bei der Entwicklung zu berücksichtigen waren. Anschließend werden das Konzept zur Erfassung der Beweglichkeit (Abschnitt 4.2) und Belastbarkeit vorgestellt (Abschnitt 4.3). Die Methode fasst die Mitarbeiterfähigkeiten in einem ergonomischen Fähigkeitsprofil zusammen (Abschnitt 4.4). Abschließend erfolgt in Abschnitt 4.5 eine erste Evaluation, welche die Durchführbarkeit und den Zeitaufwand der Fähigkeitsanalyse untersucht.

#### 4.1 Detaillierung der Anforderungen

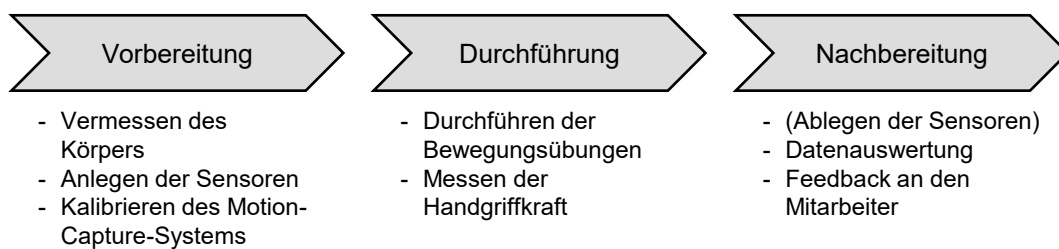
Ziel der Fähigkeitsanalyse ist es, eine aufwandsarme, aber aussagekräftige Aufnahme der arbeitsbezogenen physischen Leistungsfähigkeit zu ermöglichen. Wie das Lösungskonzept in Abschnitt 3.3.2 bereits gezeigt hat, soll die Fähigkeitsanalyse die Beweglichkeit mithilfe des Motion-Capture-Systems messen und die Belastbarkeit mit einer Messung der Handgriffkraft abschätzen. Für eine zielgerichtete Detaillierung des Lösungskonzepts ist es zunächst notwendig, die Anforderung einer aufwandsarmen Aufnahme (vgl. Abschnitt 3.2) zu konkretisieren. Hierzu wurde eine Situationsanalyse in Zusammenarbeit mit Logistikunternehmen, produzierenden Unternehmen und Beratungsfirmen durchgeführt. So konnten verschiedenen Sichtweisen der Stakeholder mithilfe von Arbeitsplatzbesichtigungen und regelmäßigen Projekttreffen fortlaufend in das Konzept eingebracht werden. Im Vergleich zu den existierenden Methoden soll diese Arbeit eine Fähigkeitsanalyse bereitstellen, die es ermöglicht, die individuellen Fähigkeiten einer gesamten Belegschaft zu erfassen, die einen direkten Bezug zum Arbeitsplatz zulassen. Bei der Entwicklung der Fähigkeitsanalyse sind somit auch die Interessen der Unternehmen und der Mitarbeiter zu berücksichtigen.

##### Unternehmen:

##### A1.1: Minimierung des Zeitaufwands mit dem Mitarbeiter

Da ein Mitarbeiter seiner eigentlichen Arbeitsaufgabe während der Fähigkeitsanalyse nicht nachgehen kann, steht vor allem der Zeitaufwand der Analyse im Fokus. Dieser fällt pro Mitarbeiter und Aufnahme an und summiert sich daher insbesondere bei großen Belegschaften schnell zu einem beachtlichen Kostenfaktor für ein Unternehmen. In Absprache mit den beteiligten Unternehmen wurde daher ein maximaler Analyseaufwand von 30 Minuten pro Mitarbeiter definiert, um die Akzeptanz der Methode seitens der Industrie

zu gewährleisten. Dieser Zeitraum umfasst alle Tätigkeiten, welche die Anwesenheit des analysierten Mitarbeiters erfordern und lässt sich in die Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung der Fähigkeitsanalyse aufteilen (vgl. Abbildung 4-1). Die einzelnen Schritte der Vorbereitung sind durch das verwendete Motion-Capture-System. Die ersten Versuche haben gezeigt, dass die Vorbereitung ca. 15 Minuten dauert. Dementsprechend sind die Schritte der Durchführung und der Nachbereitung so zu gestalten, dass die gesamte Analyse weniger als 30 Minuten dauert. Das Ablegen der Sensoren ist in Klammern aufgeführt, da es parallel zur Datenauswertung erfolgen kann.



**Abbildung 4-1: Ablauf der Fähigkeitsanalyse**

### A1.2: Nutzung mobiler Erfassungssysteme

Um eine möglichst breite Anwendung der Analyse zu gewährleisten, sollen so wenige Anforderungen wie möglich an die Unternehmen gestellt werden. Insbesondere im Hinblick auf KMU sollen so zusätzliche Kosten und Hemmnisse bei der Anwendung der Analyse vermieden werden. Ziel ist demnach, dass nur das Motion-Capture-System und ein Handdynamometer zur Aufnahme der Fähigkeiten zum Einsatz kommen. Zusätzliche Testsysteme analog zum ERGOS Work Simulator (Abschnitt 2.2.5) kommen zur Erfassung der Beweglichkeit oder Belastbarkeit daher nicht infrage.

#### Mitarbeiter:

Die Akzeptanz der Mitarbeiter spielt bei der Erfassung der physischen Leistungsfähigkeit eine sehr wichtige Rolle, da die Fähigkeitsanalyse personenbezogene Daten erfasst und daher das Einverständnis der Mitarbeiter erfordert. Interviews mit den Produktionsmitarbeitern der Unternehmen haben die folgenden Voraussetzungen für eine hohe Akzeptanz ergeben:

### A1.3: Eingeschränkter Datenzugriff

Der Zugriff auf die Daten ist auf eine unabhängige Person/Abteilung zu begrenzen. Dies soll vermeiden, dass Unternehmen die Fähigkeitsdaten in Personalentscheidungen einfließen lassen. Für die weitere Verwendung der Daten zur Arbeitsplatzanalyse sind die personenbezogenen Daten zu aggregieren und/oder zu anonymisieren.

### A1.4: Unmittelbares Feedback an den Mitarbeiter

Im Anschluss an die Aufnahme der Mitarbeiterfähigkeiten ist eine Einordnung der Messwerte wünschenswert. Aus technischer Sicht stellt dies vor allem eine Anforderung an die Auswertegeschwindigkeit und die Darstellung der Mitarbeiterfähigkeiten.

## **4.2 Erfassung der Beweglichkeit**

Die Beweglichkeit ist ein wichtiger Indikator für die physische Leistungsfähigkeit. Abschnitt 4.2.1 beschreibt zunächst die Bewegungsübungen, die ein Mitarbeiter ausführt, um die Bewegungsumfänge zu erfassen. Anschließend erläutert Abschnitt 4.2.2, wie der Software-Prototyp die Bewegungsumfänge berechnet.





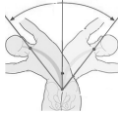



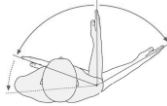





### **4.2.1 Bewegungsübungen**

Ziel der Bewegungsübungen ist es, eine Bewertungsgrundlage für die Erfassung der Beweglichkeit eines Mitarbeiters zu schaffen. Die Methode greift auf Standardübungen zurück, mit deren Hilfe die Beweglichkeit eines Gelenks bzw. der Wirbelsäule beschrieben werden kann. Das Institut für Biomechanik der BG Unfallklinik Murnau hat die Übungen ausgewählt. Prinzipiell ist es möglich, die nachfolgend beschriebenen Bewegungsübungen zu ersetzen oder die Fähigkeitsanalyse um weitere Bewegungsübungen zu ergänzen.

Um die Beweglichkeit zu erfassen, bietet sich die Neutral-Null-Methode (vgl. Abschnitt 2.2.3) an. Sie betrachtet zweidimensionale Bewegungen in der jeweiligen Körperebene, was im Vergleich zu komplexen Bewegungsabläufen den Vorteil bietet, dass der Mitarbeiter mögliche Einschränkungen nicht mit anderen Gelenken kompensieren kann. Außerdem ist es ein standardisiertes Verfahren zur Messung der Gelenkbeweglichkeit, was es ermöglicht, den gemessenen Bewegungsumfang mithilfe von Literaturwerten zu objektivieren und so mögliche Einschränkungen in der Beweglichkeit festzustellen. Diese Arbeit nutzt hierzu die Literaturwerte von Schünke et al. [SCHÜ18].

Tabelle 4-1 zeigt die Bewegungsübungen zur Erfassung der Beweglichkeit. Bei der Auswahl der Bewegungsübungen waren die zuvor detaillierten Anforderungen zu berücksichtigen. Die Zeitvorgabe von maximal 30 Minuten pro Fähigkeitsanalyse bzw. 15 Minuten für die Durchführung und Nachbereitung (vgl. Abschnitt 4.1) bestimmt daher die mögliche maximale Übungsanzahl. Inhaltlich liegt der Fokus der Bewegungsübungen darin, die Bewegungsumfänge der Gelenke zu erfassen, die ein typischer Bewegungsablauf bei Montage- und Logistiktätigkeiten beansprucht. Dementsprechend sind die in Abschnitt 3.1 herausgearbeiteten Zielregionen durch die Übungen abgebildet. Primär sollen die Bewegungsumfänge einen Vergleich mit den komplexen Bewegungen am Arbeitsplatz ermöglichen, jedoch bietet es sich an, auch Bewegungsumfänge zu erfassen, deren Einschränkung die Folge typischer Muskel-Skelett-Erkrankungen ist.

Tabelle 4-1: Bewegungsübungen zur Erfassung der Gelenkbeweglichkeit in Anlehnung an [BROS21] nach [SCHÜ18]

Körperbereich Segment 1 Segment 2	Übung/Gelenkwinkel		
<b>Halswirbelsäule</b>  Kopf T8	1. Flexion/Extension 	2. Lateralflexion 	3. Rotation 
<b>Brust- und Lendenwirbelsäule</b>  T8 Hüfte	4. Flexion 	5. Lateralflexion 	6. Rotation 
<b>Schulter</b>  Oberarm T8	7. Flexion/Extension 	8. Abduktion/Adduktion 	
	9. Außenrotation 	10. Außen-/Innenrotation (abduziert) 	
<b>Ellenbogen</b>  Oberarm Unterarm	11. Flexion 		
<b>Handgelenk</b>  Hand Unterarm	12. Flexion/Extension 	13. Abduktion/Adduktion 	
<b>Knie</b>  Oberschenkel Unterschenkel	14. Flexion 		

Bei der Aufnahme legt der untersuchte Mitarbeiter das Motion-Capture-System an und führt jede Bewegungsübung zweimal aus. Die Bewegungen führt er frei stehend bis zum Erreichen des jeweiligen Bewegungsmaximums aus, das er ohne Schmerzen mit einer kontrollierten Bewegung erreicht. Dies geschieht unter Anleitung eines in der Methode geschulten Mitarbeiters, der die Übungen erklärt und vorführt. Registriert der Methoden-anwender beim untersuchten Mitarbeiter eine falsche Bewegungsausführung, korrigiert er die Bewegung mündlich und lässt sie so lange wiederholen, bis die Aufnahme zwei korrekt ausgeführte Wiederholungen enthält.

### 4.2.2 Berechnung der Gelenkwinkel

Liegen die Daten der Bewegungsübungen eines Mitarbeiters vor, berechnet der Software-Prototyp die Gelenkwinkel.

#### Daten zur Berechnung der Gelenkwinkel

Zur Berechnung der Gelenkwinkel nutzt der Software-Prototyp die Positions- und Rotationsdaten des aufgenommenen Mitarbeiters. Hierzu exportiert der Anwender aus der Aufnahmesoftware eine MVNX-Datei, welche die Daten im XML-Format speichert und ebenfalls die Maße des Menschmodells enthält. Da die Erfassungssoftware ein anderes Koordinatensystem als die Entwicklungsumgebung nutzt, transformiert ein Skript bereits beim Datenimport die Bewegungsdaten. Die Positionsdaten werden für jedes Körpersegment als dreidimensionaler Vektor im globalen Koordinatensystem gespeichert und die Rotationsdaten liegen als Quaternionen vor.

Quaternionen sind ein vierdimensionaler Vektorraum, der in der grafischen Datenverarbeitung genutzt wird, um Rotationen zu beschreiben. Analog zu den komplexen Zahlen haben sie einen realen und einen imaginären Anteil. Gleichungen (4-1) und (4-2) zeigen zwei mögliche Darstellungsformen einer Quaternion. Da diese Arbeit Quaternionen nur auf Anwenderebene betrachtet, sei für weitere Informationen und Rechenregeln auf tiefergehende Literatur verwiesen, wie zum Beispiel [KUIP20].

$$q = q_0 + q_1 \cdot i + q_2 \cdot j + q_3 \cdot k \quad (4-1)$$

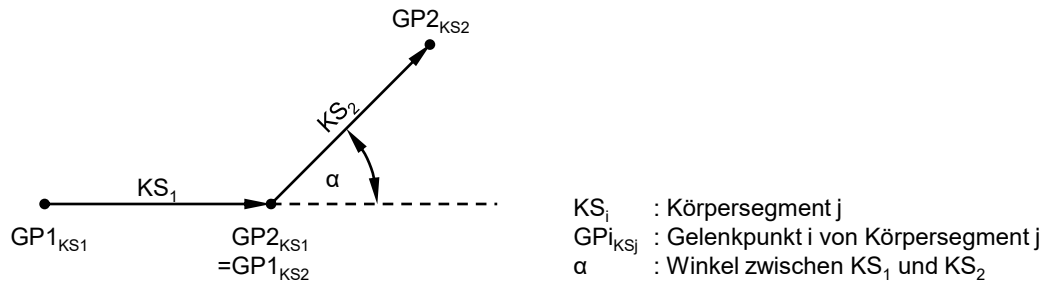
$$q = q_0 + v \quad (4-2)$$

$q$  Quaternion [-]  
 $q_0$  Realteil [-]  
 $v$  Imaginärteil [-]  
für  $i, j$  und  $k$  gilt  $i^2 = j^2 = k^2 = i \cdot j \cdot k = -1$

#### Berechnung der Gelenkwinkel

Die Gelenkwinkel aus Tabelle 4-1 berechnet der Software-Prototyp auf zwei unterschiedlichen Wegen, die nachfolgend beschrieben werden.

Der einfachste Fall ist die Berechnung des Flexionswinkels des Ellenbogens (Tabelle 4-1, Übung 11) und Knies (Tabelle 4-1, Übung 14). Abbildung 4-2 zeigt schematisch, wie die Methode den Winkel zwischen zwei Körpersegmenten berechnet.



**Abbildung 4-2: Berechnung des Winkels  $\alpha$  zwischen zwei Körpersegmenten**

Im ersten Schritt sind mit Gleichung (4-3) die zwei Vektoren zu bestimmen, zwischen denen der Gelenkwinkel berechnet werden soll. Im Fall der Ellenbogenflexion bilden diese Vektoren den Ober- und Unterarm ab, die mithilfe der Gelenkpunkte der Schulter und des Ellenbogens bzw. des Ellenbogens und des Handgelenks zu bestimmen sind.

$$\vec{KS} = \begin{pmatrix} x_{GP_2} - x_{GP_1} \\ y_{GP_2} - y_{GP_1} \\ z_{GP_2} - z_{GP_1} \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

- $\vec{KS}$       Vektor des Körpersegments  $KS$  von Gelenkpunkt  $GP1$  zu Gelenkpunkt  $GP2$  [m]
- $x_{GP_i}$      $x$ -Koordinate von Gelenkpunkt  $GP_i$  [m]
- $y_{GP_i}$      $y$ -Koordinate von Gelenkpunkt  $GP_i$  [m]
- $z_{GP_i}$      $z$ -Koordinate von Gelenkpunkt  $GP_i$  [m]

Anschließend berechnet sich der Winkel  $\alpha$  zwischen den Richtungsvektoren der beiden Körpersegmente nach Gleichung (4-4).

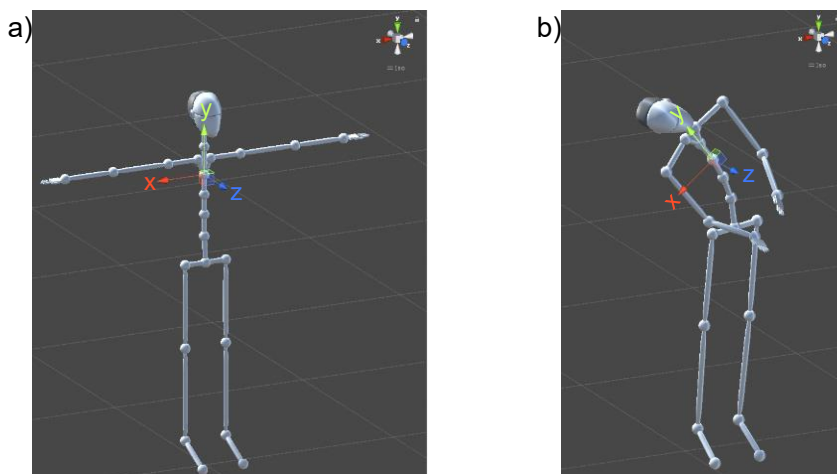
$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{KS}_1 \cdot \vec{KS}_2}{|\vec{KS}_1| \cdot |\vec{KS}_2|} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{x_{\vec{KS}_1} \cdot x_{\vec{KS}_2} + y_{\vec{KS}_1} \cdot y_{\vec{KS}_2} + z_{\vec{KS}_1} \cdot z_{\vec{KS}_2}}{\sqrt{x_{\vec{KS}_1}^2 + y_{\vec{KS}_1}^2 + z_{\vec{KS}_1}^2} \cdot \sqrt{x_{\vec{KS}_2}^2 + y_{\vec{KS}_2}^2 + z_{\vec{KS}_2}^2}} \right) \quad (4-4)$$

- $\alpha$       Winkel zwischen den Vektoren der Körpersegmente  $KS_1$  und  $KS_2$  [°]
- $x_{\vec{KS}}$      $x$ -Komponente des Richtungsvektors  $\vec{KS}$  von Körpersegment  $KS$  [-]
- $y_{\vec{KS}}$      $y$ -Komponente des Richtungsvektors  $\vec{KS}$  von Körpersegment  $KS$  [-]
- $z_{\vec{KS}}$      $z$ -Komponente des Richtungsvektors  $\vec{KS}$  von Körpersegment  $KS$  [-]

Für die restlichen Körperbereiche berechnet der Software-Prototyp unterschiedliche Gelenkwinkel, je nachdem in welcher Körperebene der Mitarbeiter die Bewegung ausführt. Hierzu empfiehlt die International Society of Biomechanics die Beschreibung der Rotation in Eulerwinkel mittels YXY-Drehfolge zu berechnen, die ein Objekt zuerst um seine  $y$ -Achse, anschließend um die neue  $x$ -Achse  $x'$  und zum Abschluss um die neue  $y$ -Achse  $y'$ . Diese Standardisierung von Wu et al. [WU05] orientiert sich an den klinischen Definitionen der Gelenkwinkel, die nur im zweidimensionalen definiert sind (siehe Tabelle

4-1). Ziel ist es jedoch, die erfassten Bewegungsumfänge mit den Gelenkwinkeln aus der komplexen Bewegung zu vergleichen. Hier unterscheiden sich die Gelenkwinkel, je nachdem, welche Drehfolge man bei der Berechnung nutzt. Beispielsweise führt eine Flexion und anschließende Abduktion der Schulter zu anderen Gelenkwinkeln als eine Abduktion mit anschließender Flexion [ANGL00, S. 549-550]. Die Folge hieraus wäre eine Unterschätzung des einen und eine Überschätzung des anderen Gelenkwinkels. Um dies zu umgehen, berechnet der Software-Prototyp die Gelenkwinkel, indem er die Vektoren der Körpersegmente in die Körperebenen projiziert:

Jedem Körpersegment ist ein lokales Koordinatensystem zugeordnet, dessen Position und Rotation den importierten Daten entspricht. Das lokale Koordinatensystem vom T8-Wirbelsäulensegment ist in Abbildung 4-3 dargestellt. In der sog. Identity-T-Pose stimmt die Orientierung mit dem globalen Koordinatensystem überein (vgl. Abbildung 4-3a) und dreht sich gemäß den importierten Bewegungsdaten (vgl. Abbildung 4-3b). Die lokalen Koordinatensysteme ermöglichen es somit, Körperebenen (vgl. Abschnitt 2.2.3) während der Bewegung zu definieren. Die lokalen Achsen des T8-Wirbelsäulensegments definieren beispielsweise die Körperebenen bei der Berechnung der Gelenkwinkel der Schulter. Die Flexion/Extension erfolgt während der Bewegungsübungen in der Sagittalebene, die der lokalen y-z-Ebene des T8-Wirbelsäulensegments entspricht. Bei der Abduktion/Adduktion findet die Bewegung hingegen in der Frontalebene statt, die der lokalen x-y-Ebene des T8-Körpersegments entspricht.



**Abbildung 4-3: Das importierte Menschmodell mit dem lokalen Koordinatensystem vom T8-Körpersegment und dem globalen Koordinatensystem oben rechts: a) Identity-T-Pose; b) Körper in Bewegung**

Eine Ebene ist durch ihren Normalenvektor eindeutig definiert. Zum Beispiel definiert die x-Achse die y-z-Ebene eines Koordinatensystems, da sie orthogonal zu ihr steht. Ge-

sucht sind zunächst die auf die Körperebene projizierten Richtungsvektoren der Körpersegmente, zwischen denen der Winkel berechnet wird. Hierzu verwendet der Software-Prototyp Gleichung (4-5):

$$\overrightarrow{KS}_{p,E} = \overrightarrow{KS} - \frac{\overrightarrow{KS} \circ \vec{n}_E}{\|\vec{n}\|^2} \cdot \vec{n}_E = \overrightarrow{KS} - \frac{x_{\overrightarrow{KS}} \cdot x_{\vec{n}_E} + y_{\overrightarrow{KS}} \cdot y_{\vec{n}_E} + z_{\overrightarrow{KS}} \cdot z_{\vec{n}_E}}{x_{\vec{n}_E}^2 + y_{\vec{n}_E}^2 + z_{\vec{n}_E}^2} \cdot \vec{n}_E \quad (4-5)$$

$\overrightarrow{KS}_{p,E}$ : Projektion des Richtungsvektors von Körpersegment KS auf Ebene E [-]

$\vec{n}_E$ : Normalenvektor der Ebene E [-]

$x_{\overrightarrow{KS}}$ : x-Komponente des Richtungsvektors  $\overrightarrow{KS}$  von Körpersegment KS [-]

$y_{\overrightarrow{KS}}$ : y-Komponente des Richtungsvektors  $\overrightarrow{KS}$  von Körpersegment KS [-]

$z_{\overrightarrow{KS}}$ : z-Komponente des Richtungsvektors  $\overrightarrow{KS}$  von Körpersegment KS [-]

Sind die projizierten Vektoren bekannt, berechnet sich der Gelenkwinkel mit Gleichung (4-4). Die Drehrichtung des Winkels kann anschließend mit Gleichungen (4-6) und (4-7) bestimmt werden. Gleichung (4-6) berechnet hierbei das Kreuzprodukt der Richtungsvektoren der beiden Körpersegmente, das einen orthogonalen Vektor ergibt. Gleichung (4-7) prüft im Anschluss, ob der Vektor des Kreuzprodukts und der Normalenvektor der Ebene in dieselbe Richtung zeigen. Entsprechend den Vorzeichen ordnet der Software-Prototyp die gemessenen Bewegungsumfänge der jeweiligen Bewegung zu und speichert diese. Beispielsweise entsprechen ein positiver Winkel einer Schulterflexion und ein negativer Winkel einer Schulterextension.

$$\vec{n}_{\overrightarrow{KS}_1, \overrightarrow{KS}_2} = \overrightarrow{KS}_1 \times \overrightarrow{KS}_2 \quad (4-6)$$

$$VZ_\alpha = \text{sgn}(\vec{n}_{\overrightarrow{KS}_1, \overrightarrow{KS}_2} \circ \vec{n}_E) \quad (4-7)$$

$\vec{n}_{\overrightarrow{KS}_1, \overrightarrow{KS}_2}$ : Kreuzprodukt der Richtungsvektoren KS1 und KS2 [m]

$\vec{n}_E$ : Normalenvektor der Ebene E [-]

$VZ_\alpha$ : Vorzeichen als Indikator zur Drehrichtung des gemessenen Winkels  $\alpha$  [-]

$\text{sgn}$ : Signumfunktion [-]

Mit Ausnahmen treten die Maxima der Gelenkwinkel bei der Ausführung der jeweiligen Bewegungsübung auf. Der Software-Prototyp berechnet die Gelenkwinkel daher ohne Bezug zur konkreten Fähigkeitsübung für jeden Datenpunkt und speichert das jeweilige Maximum im Fähigkeitsprofil. Lediglich für die Berechnung der Schulterwinkel definiert der Softwareprototyp unterschiedliche Bedingungen, wann der jeweilige Winkel zu berechnen ist:

Schulterflexion/-extension: Die Arme sind bei der Bewegungsausführung möglichst durchgestreckt, was der Software-Prototyp bei einer Ellenbogenflexion unter 40 Grad detektiert. Um sicherzustellen, dass die Handinnenflächen zur Körpermitte zeigen, ist als weitere Bedingung definiert, dass zwischen der vom lokalen Koordinatensystem des T8-Wirbelsäulensegments definierten Transversalachse und dem Normalenvektor der Handinnenfläche ein Winkel von unter 30 Grad besteht.

Schulterabduktion/-adduktion: Der Ellenbogen befindet sich weniger als 25 cm vor oder hinter dem Körper. Hierzu vergleicht der Software-Prototyp die Lage des T8-Segments mit der Lage des jeweiligen Ellenbogens.

Schulteraußenrotation: Der Softwareprototyp berechnet die Schulteraußenrotation nur, wenn der Winkel zwischen dem Oberarm und der Longitudinalachse unter 40 Grad liegt und die Ellenbogenflexion 70 bis 110 Grad beträgt.

Außen-/Innenrotation der Schulter (90° abduziert): Der vertikale Abstand zwischen Ellenbogen und Schulter beträgt maximal 10 cm und die Ellenbogenflexion beträgt 70 bis 110 Grad.

Nur wenn die jeweilige Bedingung erfüllt ist, berechnet der Software-Prototyp den jeweiligen Gelenkwinkel der Schulter und speichert das Maximum. Die Bedingungen helfen zudem dabei, Bewegungsumfänge, die aufgrund falscher Bewegungsausführung erreicht wurden, auszusortieren. Zwar überprüft der einweisende Mitarbeiter die Bewegungsausführung, jedoch ist es wegen der freien Bewegungsausführung nicht garantiert, dass Ausgleichsbewegungen den Bewegungsumfang signifikant erhöhen. Beispielhaft ist hier die Schulterflexion zu nennen, bei der die Schulter durch ein Aufdrehen der Hände zusätzlich abduziert wird, was sich in einem höheren gemessenen Winkel äußert.

### **4.3 Erfassung der Belastbarkeit**

Zur Einschätzung der Belastbarkeit erfolgt im zweiten Teil der Fähigkeitsanalyse eine Messung der Handgriffkraft. Sie wurde vom Institut für Biomechanik der BG Unfallklinik Murnau als Indikator der Gesamtmuskelkraft ausgewählt. Es ist ebenfalls denkbar, die Messung der Handgriffkraft um weitere Kraftwerte zu erweitern, um ein umfassenderes Bild des Muskelstatus der Mitarbeiter zu gewinnen. Dies würde jedoch in einer längeren Dauer der Fähigkeitsanalyse resultieren.

Abschnitt 4.3.1 beschreibt, wie die Handgriffkraftmessung erfolgt und Abschnitt 4.3.2 erläutert, wie sich aus der Messung ein Reduktionsfaktor zur Individualisierung von Belastungsgrenzwerten ableitet.

### 4.3.1 Messung der Handgriffkraft

Zur Messung der Handgriffkraft verwendet diese Arbeit ein analoges Handdynamometer des Typs *SAEHAN SH5001*, das in Abbildung 2-5a) zu sehen ist. Bevor es zum Einsatz kommt, bestimmt der Methodenanwender mit dem Mitarbeiter die richtige GriffEinstellung aus fünf unterschiedlichen Positionen. Die Messung selbst erfolgt nach der zugehörigen Bedienungsanleitung. Hierbei steht oder sitzt die untersuchte Person bequem, hält die Schulter in einer angelegten und neutralen Position. Handgelenk und Unterarm befinden sich in Neutralstellung (vgl. Abschnitt 2.2.3) und der Ellenbogen ist um 90 Grad gebeugt. In dieser Haltung wiederholt die Testperson den Test dreimal je Hand, wobei sie zwischen den Wiederholungen die Hand wechselt. Um mögliche Ausreißer der Messung herauszufiltern, verwendet die Methode den Medianwert der drei Messungen.

### 4.3.2 Berechnung des Reduktionsfaktors

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, korreliert die Handgriffkraft mit der globalen Muskelkraft. Da die globale Muskelkraft ein maßgeblicher Faktor für die Widerstandsfähigkeit gegenüber externer Last ist, indiziert eine stark verminderte Handgriffkraft auch eine beeinträchtigte Widerstandsfähigkeit gegenüber externer Last. Um dies in einer Arbeitsplatzanalyse abzubilden, berechnet die entwickelte Methode einen Reduktionsfaktor, mit dem die allgemeinen Richtwerte zur Bewertung von Gelenkmomenten und -kräften bei stark verminderter Handgriffkraft multipliziert werden.

Zur Berechnung des Reduktionsfaktors erfolgt im ersten Schritt ein Vergleich der gemessenen Handgriffkraft mit den normativen Daten von [MATH85]. Mathiowetz et al. haben die Handgriffkraft von 310 männlichen und 318 weiblichen Probanden ohne Beschwerden der oberen Extremitäten zwischen 20 und 94 Jahren untersucht. Die Ergebnisse sind für beide Geschlechter unter Angabe des Mittelwerts und der Standardabweichung von 20 bis 75 Jahren in Altersgruppen in Intervallen von fünf Jahren sowie der Altersgruppe 75+ eingeteilt [MATH85]. Da die Handgriffkraft zwar signifikant, aber nicht perfekt mit der globalen Muskelkraft korreliert, registriert die Methode eine Einschränkung erst, wenn die Handgriffkraft unter dem alters- und geschlechtsspezifischen Mittelwert abzüglich seiner Standardabweichung liegt. Unter Annahme einer Normalverteilung reduziert die Methode demnach die Belastungsgrenzwerte nur, wenn die gemessene Handgriffkraft den unteren 15,9 % der altersspezifischen Population entspricht. Um die verminderte Belastbarkeit bei der folgenden Beurteilung zu berücksichtigen, generiert der Software-Prototyp nach Gleichung (4-8) einen Reduktionsfaktor für jede Hand.

$$R = \begin{cases} 1 & x \geq \bar{x} - SA \\ \frac{x}{(\bar{x} - SA)} & x < \bar{x} - SA \end{cases} \quad (4-8)$$

$R$  Reduktionsfaktor [-]

$x$  Messwert der Handgriffkraft [kg]

$\bar{x}$  alters- und geschlechtsspezifischer Mittelwert der Handgriffkraft [kg]

$SA$  alters- und geschlechtsspezifische Standardabweichung der Handgriffkraft [kg]

Nachfolgend erläutert ein kurzes Beispiel die Berechnung des Reduktionsfaktors: Ein 48-jähriger Mitarbeiter erreicht mit der rechten Hand eine Handgriffkraft von 32 kg. Der Mittelwert der Handgriffkraft der Altersgruppe 45 bis 49 beträgt hier 50 kg und die Standardabweichung 10 kg. In diesem Fall ist die gemessene Handgriffkraft von 32 kg deutlich kleiner als der alters- und geschlechtsspezifische Mittelwert abzüglich der Standardabweichung ( $\bar{x} - SA = 50 \text{ kg} - 10 \text{ kg} = 40 \text{ kg}$ ). Entsprechend berechnet sich der Reduktionsfaktor von  $R = \frac{32 \text{ kg}}{40 \text{ kg}} = 0,8$ .

#### 4.4 Das ergonomische Fähigkeitsprofil

Das Ergebnis der Fähigkeitsanalyse ist ein Fähigkeitsprofil, das die gemessenen Bewegungsumfänge der einzelnen Gelenke, die Handgriffkraft und die Reduktionsfaktoren umfasst. Abbildung 4-4 zeigt ein beispielhaftes Fähigkeitsprofil eines Produktionsmitarbeiters. Um die Ergebnisse leicht verständlich zu visualisieren, erzeugt der Software-Prototyp ein Menschmodell, dessen Gelenke grün eingefärbt sind, wenn die Bewegungsumfänge oberhalb der unteren Grenze des Normbereichs liegen. Liegt eine Einschränkung in der Bewegungsfähigkeit in mindestens einem Gelenkwinkel vor, so ist das gesamte Gelenk gelb eingefärbt. Der Anwender kann die gemessenen Bewegungsumfänge in diesem Fall mithilfe der unteren Grenze des Normbereichs einordnen und an den Mitarbeiter zurückmelden. Zusätzlich sind die gemessene Handgriffkraft und der Reduktionsfaktor eingeblendet. Liegt der Reduktionsfaktor unter eins, wird die Grafik ebenfalls gelb hervorgehoben. In dem Beispiel aus Abbildung 4-4 ist die linke Schulter in ihrer Außenrotation und in der Flexion eingeschränkt. Die HWS hat eine minimale Einschränkung in ihrer Rotation nach rechts. Während die gemessene Handgriffkraft der linken Hand in einem normalen Bereich liegt, ist die gemessene Handgriffkraft der rechten Hand gegenüber dem Durchschnittswert stark reduziert. Mit Gleichung (4-8) berechnet sich ein Reduktionsfaktor von 0,8. Bei den nachfolgenden Arbeitsplatzbewertungen für diesen Mitarbeiter reduzieren sich demnach die Belastungsgrenzwerte um diesen Faktor. Abschnitt 5.4.1 beschreibt dieses Vorgehen im Detail.

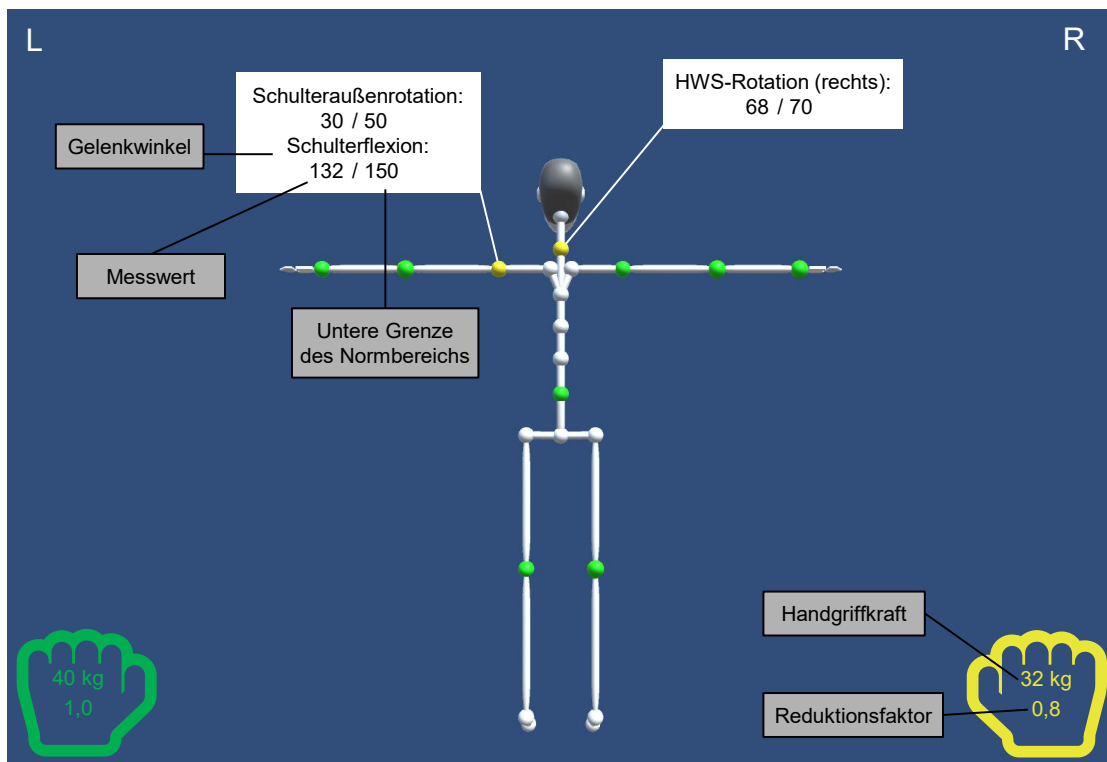


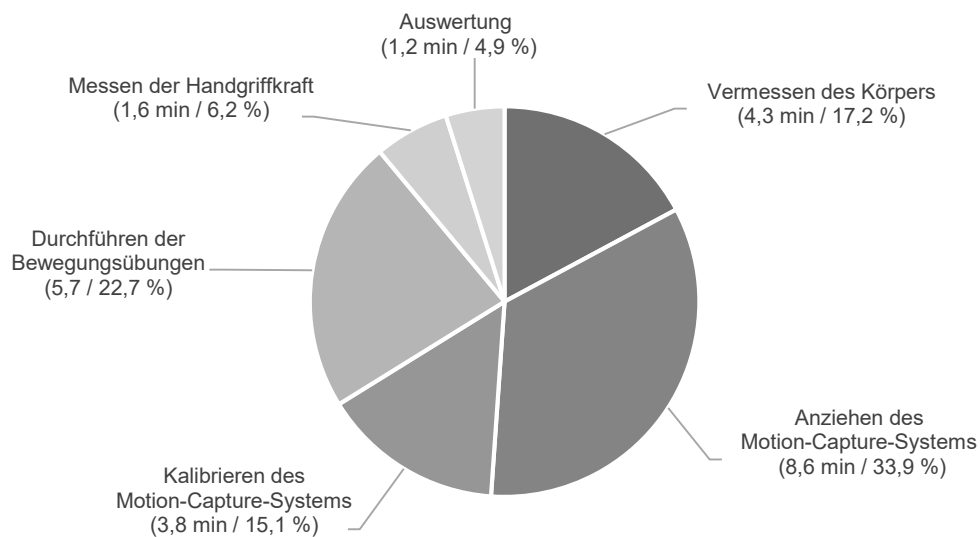
Abbildung 4-4: Das ergonomische Fähigkeitsprofil in Anlehnung an [BROS22, S. 25]

Wie in Abschnitt 3.3 bereits erwähnt, liegt der Fokus dieser Arbeit darin, Unternehmen bei der Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen auf Basis der Arbeitsplatzbewertungen zu unterstützen. In der Theorie ist ebenfalls eine Maßnahmenableitung anhand des vorgestellten Fähigkeitsprofils eines Mitarbeiters möglich. Beispielsweise ist es denkbar, bei Einschränkungen in der Beweglichkeit einzelner Gelenke oder auch der Handgriffkraft gezielt Übungen zur Fähigkeitsverbesserung zu empfehlen. Ohne ein systematisches Vorgehen zur Maßnahmenempfehlung und der entsprechenden Schulung des Methodenanwenders sieht die Methode derzeit vor, etwaige Einschränkungen lediglich an den Mitarbeiter zurückzumelden und ggf. einen Besuch beim Betriebsarzt zu empfehlen.

### 4.5 Evaluation

Für die Evaluation der Fähigkeitsanalyse wurde das entwickelte Verfahren mit einer Probandengruppe ( $n = 21$ ) aus Studierenden durchgeführt. Ziel der Untersuchung war, die Durchführbarkeit und den Zeitbedarf der Fähigkeitsanalyse zu testen. Die Anwendung in der Industrie ist in Abschnitt 6.4 beschrieben. Die Genauigkeit war keine Zielgröße der Evaluation, da das Motion-Capture-System hinreichend genau ist (vgl. Abschnitt 2.4.4).

Bei der Aufnahme der 21 Testpersonen hat die Fähigkeitsanalyse durchschnittlich eine Gesamtdauer von 25,2 Minuten. Diese umfasst alle in Abbildung 4-1 enthaltenen Tätigkeiten, bis auf das Feedback an den Mitarbeiter. Da in dem Feedback-Gespräch lediglich mögliche Defizite gegenüber den Normwerten aufgezeigt werden, liegt der Zeitaufwand unter 30 Minuten. Abbildung 4-5 zeigt, wie sich die Zeitaufwände der einzelnen Tätigkeiten aufteilen. Die Auswertung schließt den notwendigen Datenexport aus der Aufnahme-Software ein. Die eigentliche Auswertung geschieht in weniger als zehn Sekunden.



**Abbildung 4-5: Durchschnittlicher Zeitaufwand der Fähigkeitsanalyse exklusive Feedback-Gespräch**

Es fällt auf, dass die Vorbereitung des Motion-Capture-Systems beinahe die Hälfte des Zeitaufwands (49 %) ausmacht. Naheliegender ist daher die Verwendung eines anderen Motion-Capture-Systems, um die Bewegungsumfänge zu erfassen. Hierzu wurden verschiedene markerlose optische Motion-Capture-Systeme getestet. Sie eignen sich zwar zur Erfassung einfacher Bewegungen wie der Schulterflexion [BROS20], jedoch stößt die Technologie bei komplexeren Bewegungen an ihre Grenzen. In weiterführenden Versuchen konnten lediglich fünf der 14 Bewegungsübungen automatisiert erfasst werden.

### 5 Arbeitsplatzanalyse

Dieses Kapitel beschreibt die Arbeitsplatzanalyse der Methode, die ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem Institut für Biomechanik der BG Unfallklinik Murnau entwickelt wurde. Ziel der Arbeitsplatzanalyse ist es, die Arbeitsplatzbelastung für einen Mitarbeiter unter Berücksichtigung seiner Leistungsfähigkeit individuell zu bewerten. Die Ergebnisse sollen Unternehmen zudem bei der Ableitung ergonomischer Verbesserungsmaßnahmen unterstützen.

Im ersten Schritt detailliert Abschnitt 5.1 die Anforderungen an die Arbeitsplatzanalyse. Anschließend geht Abschnitt 5.2 auf die Datenerfassung am Arbeitsplatz ein. Mithilfe der erfassten Daten werden Belastungskennwerte berechnet (Abschnitt 5.3), welche die Methode mit individuellen Bewertungsschemata (Abschnitt 5.4) zu einer Gesamtbewertung zusammenfasst (Abschnitt 5.5). Um die Maßnahmenableitung zu unterstützen, stellt Abschnitt 5.6 einen Maßnahmenkatalog vor. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5.7 eine erste Evaluation, die exemplarisch prüft, ob die Arbeitsplatzanalyse eine detaillierte individuelle Bewertung von Arbeitsabläufen mit anschließender Maßnahmenableitung ermöglicht.

#### 5.1 Detaillierung der Anforderungen

Ziel der Arbeitsplatzanalyse ist es, eine aufwandsarme Aufnahme und eine individuelle Bewertung der Belastungen am Arbeitsplatz für einen Mitarbeiter zu ermöglichen. Um eine derartige Lösung zu gestalten, ist zunächst eine Detaillierung der Anforderungen A2 (Berücksichtigung der individuellen Fähigkeiten bei der Arbeitsplatzbewertung), A3 (Hohe Detaillierung bei der Arbeitsplatzbewertung) und A4 (Unterstützung bei der Ableitung ergonomischer Maßnahmen) erforderlich (vgl. Abschnitt 3.2). Die Detaillierung der Anforderungen hat analog zu Abschnitt 4.1 in Absprache mit den am Projekt beteiligten Unternehmen stattgefunden.

##### Unternehmen:

##### A2.1: Alle Daten sind mit mobilen Erfassungsgeräten vor Ort aufzunehmen

Aus Unternehmenssicht ist entscheidend, welcher Vorbereitungsaufwand eine ergonomische Arbeitsplatzanalyse erfordert, insbesondere in Bezug auf die notwendige Datengrundlage. Etablierte Software-Lösungen nutzen in der Regel CAD-Objektdaten als Datengrundlage für die Prozesssimulation [SPIT16, S. 231]. Ein vollständiges digitales Abbild der Produktion ist jedoch häufig nicht vorhanden, insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen. Dies spiegelt sich auch in der bisherigen Anwendung von DMM wider. Bisher finden DMM zur Analyse von Produktionsarbeitsplätzen vor allem in Unternehmen aus dem Automobilbau oder der Luftfahrt Anwendung [MÜHL12, S. 77-78].

Um eine breite Anwendung der Methode zu ermöglichen, folgt die Anforderung, dass alle notwendigen Daten während einer Arbeitsplatzaufnahme erfasst werden können. Dies hat außerdem den positiven Nebeneffekt, dass die Methode als Beratungsleistung angeboten werden kann, was das Hemmnis hoher Anschaffungs- und Betriebskosten umgeht.

### A3.1: Risikobewertung für jede Zielregion

Eine hohe Detaillierung der Analyse erleichtert es Unternehmen, kritische Arbeitsschritte zu identifizieren. Da bei einem Risikowert für eine komplexe Körperhaltung nicht immer eindeutig ersichtlich ist, welche Zielregion eine hohe Belastung erfährt, soll die Methode das individuelle ergonomische Risiko für jede Zielregion separat bewerten.

### A3.2: Berücksichtigung typischer Belastungsarten

Bei Montage- und Logistikarbeitsplätzen sind sowohl dynamische als auch statische Belastungen des Muskel-Skelett-Systems zu erwarten. Zusätzlich zur Körperhaltung erfolgt eine Belastung durch das Lastgewicht der Arbeitsmittel, mit denen der Mitarbeiter interagiert. Daher soll die Methode Kennwerte berechnen, die das Risiko durch statische und dynamische Körperhaltungen und durch Lastenhandhabung beschreiben. Da verschiedene Belastungsarten unterschiedliche ergonomische Maßnahmen erfordern können, soll die Arbeitsplatzbewertung für jede Belastungsart separat erfolgen.

### A4.1: Arbeitsplatzverbesserung ohne ergonomisches Fachwissen

Der Einsatz von DMM erfordert zudem ergonomisches Fachwissen und ist mit einem hohen Zeitaufwand und hohen Kosten verbunden [MÜHL12, S. 89-90], was ein weiteres Hemmnis für kleine und mittlere Unternehmen für die Nutzung dieser Technologie darstellt [SPIT16, S. 230]. Gespräche mit den Unternehmen und Arbeitsplatzbesichtigungen haben zwar gezeigt, dass ergonomische Gesichtspunkte bei der Arbeitsplatzgestaltung Berücksichtigung finden, jedoch ohne die Belastungen am Arbeitsplatz durchgängig zu bewerten. Dementsprechend ist grundlegendes ergonomisches Fachwissen vorhanden, aber ein tiefergehendes Verständnis von Assessment-Verfahren fehlt. Als Anforderung folgt, dass die Ergebnispräsentation der Risikobewertung auf Arbeitsschrittebene einschließlich möglicher Abstellmaßnahmen erfolgen sollte.

### Mitarbeiter:

### A2.2: Anonymisierung der Mitarbeiter

Aus Mitarbeitersicht ergeben sich zwei Anforderungen im Kontext des Datenschutzes. Wie auch bei der Fähigkeitsanalyse soll die Möglichkeit bestehen, die Analyseergebnisse

zu anonymisieren. Darüber hinaus hat sich für einzelne Mitarbeiter als Hemmnis erwiesen, die Mitarbeiter während einer Aufnahme zu filmen. Als weitere Anforderung resultiert daraus, eine Möglichkeit zu schaffen, die Arbeitsplatzaufnahme ohne Videomaterial durchzuführen.

### A4.2: Mitarbeiterereinbindung bei der Arbeitsplatzverbesserung

Es ist sinnvoll und erforderlich, Mitarbeiter in die Arbeitsplatzverbesserung einzubeziehen, weil diese den Arbeitsplatz sehr gut kennen. So können Unternehmen die subjektive Einschätzung der Mitarbeiter zur Arbeitsplatzbelastung einholen. Außerdem ist die Akzeptanz der Maßnahmen besonders hoch, wenn die Mitarbeiter sie selbst vorgeschlagen haben oder ein Mitspracherecht bei der Auswahl hatten.

## **5.2 Datenerfassung am Arbeitsplatz**

Um die Arbeitsplatzanforderungen für jeden Arbeitnehmer zu ermitteln, ist es notwendig, den Bewegungsablauf am Arbeitsplatz mit dem Motion-Capture-System aufzunehmen und zusätzlich die vom Mitarbeiter bewegten Gewichte zu erfassen und mit den Bewegungsdaten zu verknüpfen. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die Vorbereitung (Abschnitt 5.2.1), die Durchführung (Abschnitt 5.2.2) und die Nachbereitung der Aufnahme (Abschnitt 5.2.3).

### **5.2.1 Vorbereitung der Aufnahme**

Im ersten Schritt der Vorbereitung einer Aufnahme bespricht der Methoden Anwender den Arbeitsablauf mit dem Mitarbeiter. Ziel ist es, zu klären, wo sich der Mitarbeiter während der Ausführung der Arbeitstätigkeit aufhält. In Innenräumen hat das verwendete Motion-Capture-System eine Reichweite von bis zu 20 m. Dementsprechend ist eine geeignete Position des Empfängers zu wählen und ggf. sicherzustellen, dass der Laptop inkl. Empfänger mobil sind, falls die Tätigkeit es erfordert, sich weiter vom Arbeitsplatz zu entfernen.

Außerdem ist zu klären, welche Objekte (z. B. Werkzeuge, Werkstücke oder Pakete) der Mitarbeiter während der Arbeitstätigkeit handhabt. Alle bewegten Gewichte über drei Kilogramm sind während der Aufnahme vom Methoden Anwender zu erfassen. Um die Gewichte zu bestimmen, können Dokumente wie zum Beispiel Arbeitsanweisungen und Stücklisten verwendet werden, wenn die Datenqualität ausreichend ist. Im Zweifel sollte das Gewicht mit einer Waage erfasst und notiert werden.

Im letzten Schritt der Vorbereitung legt der Mitarbeiter das Motion-Capture-System an und führt die Kalibrierung durch. Die Körpermaße sollten bereits aus der Fähigkeitsana-

lyse vorliegen und im Software-Prototyp hinterlegt sein. Im Idealfall erfolgt die Aufnahme am Arbeitsplatz direkt im Anschluss an die Fähigkeitsanalyse, um unnötige Zeitaufwände durch das An- und Ablegen der Sensorik zu vermeiden.

### 5.2.2 Durchführung der Aufnahme

Für eine individuelle Analyse jedes Mitarbeiters ist es notwendig, jeden Mitarbeiter am Arbeitsplatz zu erfassen. Alternativ ist es auch möglich, nur einen Mitarbeiter aufzunehmen, dessen Bewegungsdaten in einem späteren Schritt auf andere Körpergrößen transformiert werden können (vgl. Abschnitt 6). Ist die Bewegungstransformation gewünscht, sollte die Aufzeichnung mit einem Mitarbeiter mittlerer Größe durchgeführt werden, um die Unterschiede in der Körpergröße bei der Bewegungstransformation zu minimieren. Grundvoraussetzung für eine Aufnahme ist zudem, dass die aufzunehmenden Mitarbeiter mit dem Arbeitsablauf vertraut sind.

Ziel der Aufnahme ist es, den Prozess möglichst unverfälscht aufzunehmen. Zum einen bezieht sich dies auf das ergonomische Verhalten am Arbeitsplatz. Selbst wenn im Unternehmen detaillierte Standards für die Arbeitsabläufe definiert sind, entwickeln die Beschäftigten aufgrund schlechter Arbeitsplatzgestaltung, ungeeigneter Hilfsmittel oder anspruchsvoller Vorgabezeiten ihre eigenen Arbeitsweisen. Die Identifizierung ergonomisch ungünstiger Arbeitsschritte und die anschließende ergonomische Intervention müssen daher am Ist-Zustand erfolgen, um neue Standards zu entwickeln. Beispielhaft ist hier die Verwendung von Hilfsmitteln wie Hebehilfen aufzuführen. Zum anderen ist zu beachten, dass der Methodenanwender die Aufnahme so wenig beeinflusst wie möglich. Eingriffe in den Prozess sind zwar wegen der notwendigen Kommunikation nicht komplett auszuschließen, aber auf ein Minimum zu reduzieren.

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, ist ein mögliches Hemmnis für eine Analyse der Belastungen am Arbeitsplatz, den Bewegungsablauf mit einer Kamera aufzuzeichnen. Um dieses Hemmnis zu umgehen, nutzt die Methode eine eigene Analyse in der Web-App *CheckIT*, die Grabner im Zuge seiner Promotion für ein methodengestütztes Produktivitätsmanagement entwickelt hat [GRAB20]. Abbildung 5-1 zeigt die Nutzeroberfläche der Web-App. Während der Mitarbeiter die Arbeitsaufgabe ausführt, nimmt der Methoden-anwender die Gewichte auf. Greift der Mitarbeiter nach einem Objekt, das mehr als drei Kilogramm wiegt, erfasst die Web-App im ersten Schritt die Hand, die das Objekt aufnimmt und speichert den Zeitstempel. Im zweiten Schritt wählt der Methoden-anwender beim Loslassen des Objekts eine Gewichtsklasse aus. Diese sind in Anlehnung an die Leitmerkmalermethode *manuelles Heben, Halten und Tragen von Lasten* (3 - 5 kg, 5 - 10 kg, 10 – 15 kg, ... , > 40 kg) definiert [BAUA19, S. 163]. Die Web-App speichert den Zeitstempel für beide Aktivitäten und stellt sie am PC als CSV-Datei bereit.

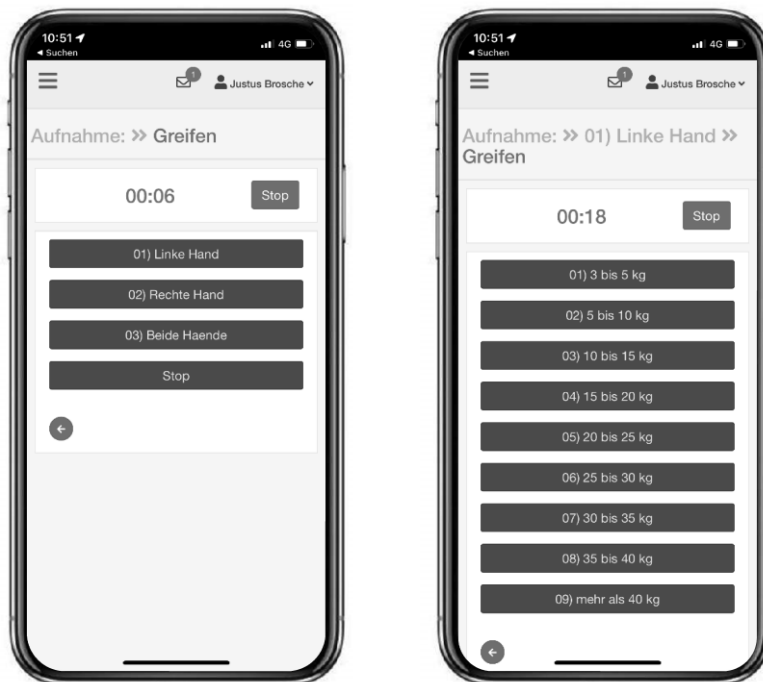


Abbildung 5-1: Web-App *CheckIT* zur Aufzeichnung der Gewichte

Zusätzlich zur Bewegungs- und Gewichtserfassung ist es ratsam, den Arbeitsvorgang mit einer Videokamera aufzuzeichnen, um die einzelnen Arbeitsschritte nachvollziehen zu können und erfasste Gewichte in der Nachbereitung ggf. korrigieren zu können. Ist eine Videoaufzeichnung nicht möglich, hat die Anwendung in der Praxis gezeigt, dass die Mitarbeiter die Arbeitsschritte anhand des DMM problemlos erkennen können, obwohl Arbeitsplätze, Werkzeuge, Werkstücke usw. nicht angezeigt werden.

### 5.2.3 Nachbereitung der Aufnahme

Nach der Aufnahme des Arbeitsablaufs sind zunächst die erfassten Bewegungsdaten in der Aufnahme-Software aufzubereiten. Die Funktion *Reprocess HD* reduziert hierzu Fehler in der Bewegungsaufzeichnung, was insbesondere aufgrund des Sensordrifts notwendig ist, der durch die magnetischen Einflüsse im industriellen Umfeld verstärkt wird. Eine Analyse der nicht aufbereiteten Daten ist zwar möglich, jedoch insbesondere bei längeren Aufnahmen nicht empfehlenswert.

Nach dem Import der Bewegungs- und Gewichtsdaten in den Software-Prototyp ist eine Überprüfung der aufgenommenen Zeitstempel der Gewichtsdaten notwendig, da die erfassten Daten wegen der menschlichen Reaktionszeit nicht die genauen Zeitpunkte des Greifens und Loslassens wiedergeben. Zu diesem Zweck ist eine Funktion im Software-Prototyp integriert, mit dem der Anwender die Zeitpunkte korrigieren und speichern kann.

Wurde ein Video des Arbeitsablaufs aufgezeichnet, kann der Methodenanwender die Gewichte auch nachträglich hinzufügen. In diesem Fall ist eine Gewichtserfassung mittels Web-App nicht notwendig, jedoch weiterhin empfehlenswert, um den Nachbereitungsaufwand zu reduzieren.

### 5.3 Belastungskennwerte

Der Software-Prototyp berechnet aus den Bewegungs- und Gewichtsdaten verschiedene Belastungskennwerte, um mit ihnen die Arbeitsplätze ergonomisch zu bewerten. Abschnitt 5.3.1 beschreibt die Kennwerte, die Belastungen infolge von Lastenhandhabungen quantifizieren. Zur Bewertung der Körperhaltung berechnet der Software-Prototyp Gelenkwinkel (Abschnitt 5.2.2) und überprüft, ob ein Gelenk statisch ist (Abschnitt 5.3.3). Die Kennwerte werden für jeden Datenpunkt einer Aufnahme berechnet.

#### 5.3.1 Lastenhandhabung

Beim Ausführen der Arbeitsaufgabe entstehen durch externe Lasten und durch das eigene Körpergewicht Momente und Kräfte, die auf den Körper des Mitarbeiters wirken. Sind die Körperhaltung, das Körpergewicht und das Lastgewicht bekannt, ist es möglich, die wirkenden Kräfte und Momente zu berechnen. Als Kennwert für die Belastung ermittelt der Software-Prototyp die Momente der beiden Schultergelenke und des Lumbosakralgelenks (L5/S1). Zusätzlich berechnet er die Wirbelsäulenkompressionskraft an L5/S1.

Diese Arbeit nutzt die Newton-Euler-Mechanik in Anlehnung an [POTV97, S. 694], um die Gelenkmomente zu berechnen. Die Methode nimmt einen quasistatischen Zustand an, d. h. dynamische Kräfte aufgrund von Massenträgheit werden vernachlässigt. Nach dem Momentensatz bestimmen somit nur die Gewichtskräfte der distalen Körpersegmente und das bewegte Lastgewicht das Gelenkmoment. Während bei den Gelenkmomenten der Schultern maximal ein Lastgewicht wirken kann, ist es bei dem Gelenkmoment von L5/S1 möglich, dass mit beiden Händen unterschiedliche Lastgewichte bewegt werden. Für ein Gelenkmoment gilt somit:

$$M_{Gelenk} = \sum_{i=0}^n (F_{g,KSi} * d_i) + \sum_{j=0}^m (F_{g,LGj} * d_j) \quad (5-1)$$

$M_{Gelenk}$	<i>Gelenkmoment [Nm]</i>
$n$	<i>Anzahl der distalen Körpersegmente [-]</i>
$F_{g,KSi}$	<i>Gewicht des distalen Körpersegments i [N]</i>
$d_i$	<i>Hebelarm des Körpersegments i [m]</i>
$m$	<i>Anzahl der bewegten Lastgewichte (max. 2) [-]</i>
$F_{g,LGj}$	<i>Gewichtskraft des bewegten Lastgewichts j [N]</i>
$d_j$	<i>Hebelarm des bewegten Lastgewichts j [m]</i>

Da eine Bestimmung der Gewichte der Körpersegmente sehr aufwendig wäre, werden sie nach [WINT09] mit einem Prozentsatz des Körpergewichts approximiert. Beispielsweise wiegt ein Oberarm 2,8 % des gesamten Körpergewichts und der Brustkorb 21,6 % [WINT09, S. 86]. Während die distalen Segmente bei der Schultermomentberechnung nur die Oberarme, Unterarme und Hände umfassen, wirken bei der Berechnung des L5/S1-Moments zusätzlich die Gewichtskräfte des Bauchs, des Brustkorbs und des Kopfes. Die Hebelarme der jeweiligen Körpersegmente resultieren aus der Körperhaltung. Bei der Berechnung werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Vorgang wird als quasistatisch betrachtet und das Lastgewicht wirkt in der Mitte der Hand.
- Bei beidhändiger Lastenhandhabung wirkt 100 % der Last auf jede Schulter, da es nicht möglich ist, die Kraftverteilung aus der Beobachtung zu beurteilen.
- Zur Berechnung des L5/S1-Moments verteilt sich die Last bei beidhändiger Lastenhandhabung zu je 50 % auf beide Hände.
- Die Lastgewichte werden ab 3 kg erfasst und in Gewichtsklassen (3 - 5 kg, 5 - 10 kg, 10 - 15 kg, ... , > 40 kg) eingeteilt. Der Software-Prototyp nutzt die obere Intervallgrenze zur Berechnung der Kennwerte.

Zusätzlich zu den o. g. Momenten berechnet der Software-Prototyp die Kompressionskraft, die auf das L5/S1 wirkt. Neben dem L5/S1-Moment bestimmen das Lastgewicht, das Gewicht des Oberkörpers und der Rumpfwinkel die Krafthöhe. Steht der Mitarbeiter aufrecht, wirken bei einem Rumpfwinkel von 90° das gesamte Oberkörper- und Lastgewicht als Kompressionskraft auf L5/S1. Ist der Mitarbeiter hingegen vorgebeugt, erzeugt bei einem Rumpfwinkel von 0° lediglich das Moment eine Wirbelsäulenkompressionskraft [POTV97, S. 694]:

$$F_C = \frac{M_{L5/S1}}{0,06 \text{ m}} + \sin(RW) * (F_{g,LG} + F_{g,OK}) \quad (5-2)$$

$F_C$             *Wirbelsäulenkompressionskraft [N]*

$M_{L5/S1}$         *L5/S1-Moment [Nm]*

$RW$             *Rumpfwinkel zwischen der Horizontalen und dem Vektor zwischen den Wirbelsäulenabschnitten L5/S1 und C7/T1 [°]*

$F_{g,LG}$          *Gewichtskraft des bewegten Lastgewichts [N]*

$F_{g,OK}$          *Gewichtskraft des Oberkörpers (Männer: 0,536 \* Körpergewicht;  
Frauen: 0,50 \* Körpergewicht) [N]*

### 5.3.2 Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit

Die Berechnung der Gelenkwinkel erfolgt analog zur Fähigkeitsanalyse und ist in Abschnitt 4.2.2 beschrieben. Anders als bei den Bewegungsübungen führt ein Mitarbeiter

am Arbeitsplatz jedoch komplexe Bewegungen außerhalb der Körperebenen aus. Dies wirkt sich vor allem auf die ergonomischen Winkel der Schulter aus, da eine exakte Aufteilung einer komplexen Bewegung in Flexion/Extension, Abduktion/Adduktion und Rotation nicht möglich ist. Um eine Vergleichbarkeit zu den erfassten Bewegungsumfängen herzustellen, projiziert der Software-Prototyp die dreidimensionalen Bewegungen in die einzelnen Körperebenen und berechnet als Kennzahl die Auslastung des Bewegungsumfangs:

$$B_{BU} = \frac{GW_P}{GW_{BU}} \cdot 100 \% \quad (5-3)$$

$B_{BU}$  Beanspruchung des Bewegungsumfangs [%]

$GW_P$  Gelenkwinkel GW aus dem Prozess [°]

$GW_{BU}$  Bewegungsumfang des Gelenkwinkels GW aus der Fähigkeitsanalyse [°]

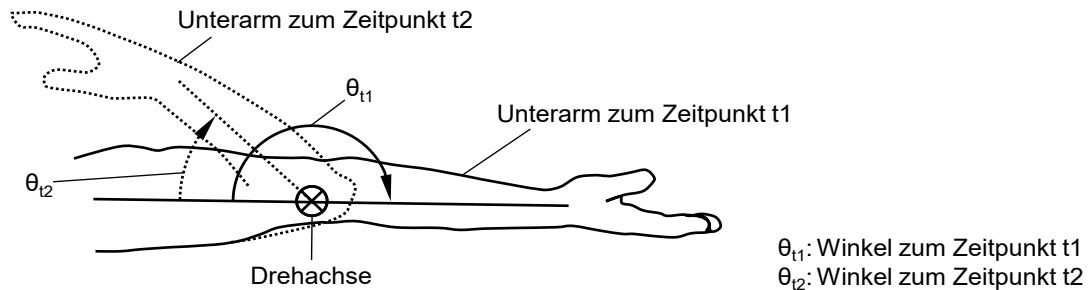
Diese Projektion in die Körperebenen anstelle der Berechnung mit YXY-Drehreihenfolge nach [WU05] umgeht zwar das Problem unterschiedlicher Drehreihenfolgen, die in unterschiedlichen Gelenkwinkeln resultieren (vgl. Abschnitt 4.2.2). Sie verursacht jedoch eine Ungenauigkeit: Die Methode teilt komplexe Armbewegungen lediglich in Flexion/Extension und Abduktion/Adduktion auf, ohne die Rotation zu berücksichtigen. Außerdem überschätzt diese Vorgehensweise tendenziell die Gelenkwinkel. Weil überschätzte Gelenkwinkel zu einer konservativeren Risikobewertung führen (vgl. Abschnitt 5.4.2), ist sie somit einer möglichen Unterschätzung eines Gelenkwinkels bei der Berechnung nach [WU05] vorzuziehen.

### 5.3.3 Statische Haltungen

Bei statischer Muskelarbeit ist ein Muskel über längere Zeit ohne Bewegung angespannt, um eine äußere Kraft auszugleichen und ein Kräftegleichgewicht herzustellen. Sie ist die ungünstigste Form der Muskelarbeit und daher mit einem hohen Gesundheitsrisiko verbunden. Um eine statische Haltung zu detektieren, betrachtet der Software-Prototyp die Orientierung der einzelnen Körpersegmente im Zeitverlauf. Anders als bei der Berechnung der Gelenkwinkel teilt die Methode eine Bewegung nicht in die verschiedenen Körperebenen auf, sondern berechnet die Winkel zwischen den Orientierungen der Körpersegmente um eine beliebige Drehachse.

Abbildung 5-2 zeigt das Beispiel einer Flexion des Ellenbogens. Bei der Flexion ohne zusätzliche Drehung des Unterarms ergibt sich für den kleinsten Winkel ohne Überstreckung immer dieselbe Drehachse: Sie steht orthogonal zum Ober- und Unterarm und zeigt in der Abbildung in die Bildebene. Führt ein Mensch mehrere Drehungen gleichzeitig oder nacheinander durch, sind die Drehachse und der resultierende Drehwinkel nicht mehr offensichtlich. Aus diesem Grund berechnet der Software-Prototyp den Drehwinkel

mithilfe der Orientierungen der beteiligten Körpersegmente. In Abbildung 5-2 ergibt sich für den Zeitraum  $t_2-t_1$  der Drehwinkel  $\theta_{t_2} - \theta_{t_1}$ .



**Abbildung 5-2: Berechnung des Drehwinkels zwischen zwei Körpersegmenten am Beispiel des Ellenbogens in Anlehnung an [SCHÜ18]**

Um den Winkel zwischen zwei Körpersegmenten zu beschreiben, nutzt der Software-Prototyp Gleichung (5-4). Für den kleinsten Winkel zwischen zwei Körpersegmenten gilt:

$$\theta_t = \cos^{-1}(q_1 \circ q_2) \cdot 2 = \cos^{-1}(q_{1,0} \cdot q_{2,0} + q_{1,1} \cdot q_{2,1} + q_{1,2} \cdot q_{2,2} + q_{1,3} \cdot q_{2,3}) \cdot 2 \quad (5-4)$$

$\theta_t$             *Kleinster Winkel zwischen zwei Körpersegmenten zum Zeitpunkt t [°]*

$q_i$              *Orientierung von Körpersegment i [-]*

$q_{i,j}$           *Komponente j des Quaternions von Körpersegment i [-]*

Der Software-Prototyp berechnet diesen Winkel zu jedem Zeitpunkt. Wenn der Drehwinkel, also die Winkeländerung zwischen den beiden Körpersegmenten, unter fünf Grad liegt, betrachtet die Methode die jeweilige Zielregion als statisch. Als Belastungskennzahl wird die Zeitdauer erfasst, in der eine Zielregion statisch ist. Analog zu den Gelenkwinkeln analysiert der Software-Prototyp die Zielregionen separat (z. B. Schultern, BWS/LWS, ..., vgl. Abschnitt 3.1).


#### 5.4 Individuelles Bewertungsschema für die Arbeitsplatzbelastung

Die zuvor beschriebenen Kennzahlen geben ohne Bewertungsschema noch keinen Aufschluss über das ergonomische Risiko der Arbeitsplatzbelastung. Die zuvor beschriebenen Kennwerte quantifizieren die körperliche Belastung im Hinblick auf äußere Lastwirkung, Beweglichkeit und statische Haltung für einen aufgezeichneten Bewegungsablauf oder auch einen transformierten Bewegungsablauf (vgl. Abschnitt 6). Um die erfassten Kennwerte zu bewerten, ist im Rahmen einer Masterarbeit, die während der Promotion betreut wurde, das nachfolgende Konzept zur Risikobewertung entstanden [OHLE21].

Als übergeordnetes Schema zur Risikobewertung greift diese Arbeit das Bewertungsschema der Leitmerkmalmethoden auf (vgl. Tabelle 5-1). Es teilt das Risiko, eine MSE

zu erleiden, in vier verschiedene Gruppen gemäß der Belastungshöhe ein. Jeder Risikogruppe sind eine Wahrscheinlichkeit einer körperlichen Überbeanspruchung, mögliche gesundheitliche Folgen und erforderliche Maßnahmen zugeordnet. Das Risiko ist zusätzlich über ein Ampelschema leicht erkenntlich. Obwohl im Folgenden eine individuelle Bewertung der Belastungen anhand der erfassten Fähigkeiten vorgestellt wird, unterscheidet das Risikokzept weiterhin zwischen vermindert belastbaren Personen und normal belastbaren Personen. Grund hierfür ist, dass neben den erfassten Fähigkeiten weitere, unabhängige Einschränkungen bestehen können, wie zum Beispiel Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

**Tabelle 5-1: Bewertungsschema/Risikokzept der Leitmerkmalmethoden in Anlehnung an [BAUA19, S. 52]**

Risiko*	Belastungshöhe		a) Wahrscheinlichkeit einer körperlichen Überbeanspruchung b) Mögliche gesundheitliche Folgen	Maßnahmen
	1	gering	a) Eine körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich. b) Gesundheitsgefährdung nicht zu erwarten.	Keine
	2	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.
	3	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.
	4	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 das Risiko mit steigender Belastungshöhe steigt.				

Die folgenden Unterabschnitte zeigen, welche Grenzwerte diese Arbeit zur Bewertung des individuellen Risikos verwendet. Abschnitt 5.4.1 zeigt die Bewertung der Lastenhandhabung, Abschnitt 5.4.2 die Bewertung der Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit und Abschnitt 5.4.3 das Bewertungsschema der statischen Haltung.

### 5.4.1 Bewertung der Lastenhandhabung

Die Bewertung der Gelenkmomente und Wirbelsäulenkompressionskräfte erfolgt nach allgemeinen Literaturwerten, die mittels Labormessungen und Simulationen ermittelt wurden. Zur Risikobewertung der berechneten Gelenkmomente nutzt diese Arbeit die in

Tabelle 5-2 zusammengestellten Richtwerte für das L5/S1-Moment und die Schultermomente. Sie klassifizieren das ergonomische Risiko für gesunde Mitarbeiter in die vier Risikokategorien aus Tabelle 5-1.

**Tabelle 5-2: Bewertungsschema der Gelenkmomente in Anlehnung an [DGUV22, S. 7] nach [TICH78] mit dem Reduktionsfaktor R (vgl. Abschnitt 4.3.2)**

Gelenkmoment		
Risiko	L5/S1 [Nm]	Schulter [Nm]
1	$< 40 \cdot R$	$< 40 \cdot R$
2	$40 \cdot R - < 85 \cdot R$	$40 \cdot R - < 80 \cdot R$
3	$85 \cdot R - < 135 \cdot R$	$80 \cdot R - < 120 \cdot R$
4	$\geq 135 \cdot R$	$\geq 120 \cdot R$

Um mögliche individuelle Einschränkungen eines Mitarbeiters zu berücksichtigen, multipliziert die Methode die Grenzwerte mit den Reduktionsfaktoren aus der Fähigkeitsanalyse (vgl. Abschnitt 4.3.2). Wurde mindestens eine signifikant eingeschränkte Handgriffkraft festgestellt, resultiert dies in niedrigeren Grenzwerten und somit einer ergonomisch ungünstigeren Risikobewertung. Die Methode multipliziert die Grenzwerte der Schultern mit dem Reduktionsfaktor der entsprechenden Körperseite. Die Grenzwerte des L5/S1-Moments multipliziert die Methode mit dem niedrigeren der beiden Reduktionsfaktoren.

Im Gegensatz zur bisherigen Risikoklassifikation haben Jäger et al. mit den revidierten Dortmunder Richtwerten alters- und geschlechtsabhängige Grenzwerte für die Wirbelsäulenkompressionskraft definiert [JÄGE19, S. 283]. Sie beruhen auf einer Vielzahl an Untersuchungen zur statischen lumbalen Kompressionsfestigkeit von Autopsiematerial, aus denen mittels linearer Regression die in Tabelle 5-3 dargestellten Richtwerte entstanden sind. Um das Überschätzungsrisiko der individuellen Festigkeit zu vermindern, haben Jäger et al. den Durchschnittswert um die Standardabweichung der betreffenden Untergruppe reduziert [JÄGE19, S. 274]. Hierbei handelt es sich um Höchstwerte, deren Überschreitung zu einer sofortigen Einstufung in die höchste Risikokategorie führt. Die Methode reduziert die Grenzwerte ebenfalls um den niedrigsten Reduktionsfaktor, wenn eine signifikant verminderte Handgriffstärke gemessen wurde.

**Tabelle 5-3: Bewertungsschema für die Wirbelsäulenkompressionskraft an L5/S1 in Anlehnung an [JÄGE19, S. 283] mit dem Reduktionsfaktor R (vgl. Abschnitt 4.3.2)**

Kompressionskraft L5/S1		
Alter [y]	Frauen [kN]	Männer [kN]
20 - 30	$4,1 \cdot R$	$5,4 \cdot R$
30 - 40	$3,8 \cdot R$	$5,0 \cdot R$
40 - 50	$3,1 \cdot R$	$4,0 \cdot R$
50 - 60	$2,4 \cdot R$	$3,1 \cdot R$
$\geq 60$	$1,8 \cdot R$	$2,2 \cdot R$

#### 5.4.2 Bewertung der Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit

Existierende Screening-Verfahren bewerten Körperhaltungen anhand der auftretenden Gelenkwinkel. Hierzu definieren sie Gelenkwinkelbereiche, die mit einem ergonomischen Risikowert verknüpft sind. Beispielsweise unterscheiden Weber et al. neutrale, mittelgradige und endgradige Winkelbereiche zur Bewertung von Körperhaltungen und Körperbewegungen und leiten hieraus mithilfe von Standardliteratur allgemeine Winkelbereiche für die verschiedenen Körperregionen ab [WEBE20, S. 23-25]. Diese Vorgehensweise berücksichtigt jedoch keine individuellen Einschränkungen der Mitarbeiter. Die Kenntnis der individuellen Bewegungsumfänge ermöglicht es, diese Grenzen für jeden Mitarbeiter individuell zu definieren.

Diese Arbeit bewertet das Risiko, eine MSE zu erleiden, für jede Zielregion mithilfe der Bewegungsumfänge aus dem Fähigkeitsprofil (vgl. Tabelle 5-4) und der Beanspruchung der Bewegungsumfänge aus der Erfassung der Arbeitsabläufe (Abschnitt 5.3.2). Da die Fähigkeitsanalyse den Bewegungsumfang einiger Zielregionen in mehreren Bewegungsrichtungen erfasst, definiert die ergonomisch ungünstigste Beanspruchung die Risikokategorie. Berechnet die Software für die HWS beispielsweise einen Flexionswinkel von 32 % des Bewegungsumfangs, einen Lateralflexionswinkel von 17 % des Bewegungsumfangs und einen Rotationswinkel von 93 % des Bewegungsumfangs, ordnet sie der gesamten Zielregion aufgrund des Rotationswinkels die Risikokategorie 3 zu. Gelenkwinkel über 100 % des Bewegungsumfangs können auftreten, weil die Analyse die dreidimensionale Bewegung des Prozesses mit der zweidimensionalen Bewegung innerhalb der Körperebenen der Fähigkeitsübungen vergleicht. Dies ist zum einen auf die Berechnung der Gelenkwinkel mittels Projektion in die Körperebenen zurückzuführen. Zum anderen kann beispielsweise die Schulter bei komplexen Bewegungen höhere Winkel erreichen, da es bei der Beugung und Streckung des Gelenks auch zu einer Rotation des Oberarmkopfes und zu Translationen im Schultergelenk kommt [NOVO98; STOK03]. Bei einer Arbeitsplatzbewertung bestimmt der Software-Prototyp für jeden Datenpunkt das

ergonomische Risiko durch die Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit. Dem Risiko-konzept entsprechend (vgl. Tabelle 5-1) sind für Bewegungen nahe des maximalen Be-wegungsumfangs Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen zu prüfen.

**Tabelle 5-4: Bewertungsschema der Gelenkwinkel in Anlehnung an [TANN13, S. 9; WEBE20, S. 23]**

Gelenkbeweglichkeit	
Risiko	Beanspruchung des Bewegungsumfangs [%]
1	< 50
2	50 - < 90
3	90 - < 100
4	≥ 100

Neben der Betrachtung einzelner Datenpunkte bewertet die Methode zusätzlich die Zeit-anteile, in denen ein Mitarbeiter Gelenkstellungen einnimmt, die mit einem erhöhten er-gonomischen Risiko verbunden sind. Hierzu kumuliert der Software-Prototyp für eine Zielregion alle Zeitanteile einer Aufnahme, in denen die Beanspruchung des Bewegungs-umfangs mehr als 50 % beträgt. Auch hier definiert der ungünstigste Winkel um eine Kör-perachse das Risiko des gesamten Gelenks.

Während eine Beanspruchung von mehr als 90 % des Bewegungsumfangs bereits bei kurzen Zeitdauern dazu führen sollte, dass ergonomische Maßnahmen in Betracht gezo-gen werden, berücksichtigt die Bewertung der kumulierten Zeitanteile insbesondere die Gelenkwinkel zwischen 50 % und 90 % der Bewegungsumfänge. Diese Gelenkwinkel erfordern keine unmittelbare ergonomische Intervention, wenn sie nur kurzzeitig auftre-ten, können aber bei längerer Exposition zu MSE führen. Als Beispiel ist hier eine falsche Arbeitshöhe anzuführen. Ist ein Arbeitstisch zu hoch, führt dies dazu, dass ein Mitarbeiter seine Ellenbogen in der Regel um mehr als 50 % seines Bewegungsumfangs gebeugt hat.

Die Einordnung der kumulierten Zeitanteile in die entsprechenden Risikokategorien er-folgt nach [WEBE20, S. 26] (siehe Tabelle 5-5). Da Weber et al. keine Angaben zu den Beinen bzw. dem Kniegelenk machen, setzt die Arbeit einen Zeitanteil von 12,5 % in der letzten Spalte nach [DGUV14, S. 36] an. Dieser Zeitanteil bezieht sich auf die wissen-schaftliche Begründung für die Berufskrankheit Gonarthrose, die besagt, dass eine kumu-lative Exposition gegenüber kniebelastenden Körperhaltungen (Hocken, Knien, Kriechen oder Fersensitzen) mit einer Mindestdauer der Exposition von einer Stunde pro Schicht als kritischer Wert gilt. Bei einer Schichtdauer von acht Stunden entspricht dies einem Zeitanteil von 12,5 %.

**Tabelle 5-5: Zeitliches Bewertungsschema der Gelenkbeweglichkeit in Anlehnung an [WEBE20, S. 26; DGUV14, S. 36]**

Risiko	Zeitanteil über 50 % der Gelenkbeweglichkeit [%]					
	HWS	Schulter	Ellenbogen	Handgelenk	BWS/LWS	Knie
1	< 6	< 4	< 8	< 7	< 5	< 12,5
2	6 - < 19	4 - < 13	8 - < 23	7 - < 20	5 - < 15	-
3	19 - < 29	13 - < 20	23 - < 34	20 - < 30	15 - < 22	-
4	≥ 29	≥ 20	≥ 34	≥ 30	≥ 22	≥ 12,5

### 5.4.3 Bewertung der statischen Haltung

Die Methode betrachtet einen Körperbereich als statisch, solange er sich um weniger als fünf Grad um eine beliebige Achse dreht (vgl. Abschnitt 5.3.3). Um das Risiko einer statischen Haltung zu bewerten, definiert diese Arbeit lediglich drei Risikokategorien in Anlehnung an [KILB94, S. 61]. Wie in Tabelle 5-6 dargestellt, ist ein statischer Körperbereich bis 30 Sekunden als unbedenklich einzustufen. Da die Risikokategorie 2 entfällt, folgt ab 30 Sekunden Risikokategorie 3 und ab 60 Sekunden Risikokategorie 4.

**Tabelle 5-6: Bewertungsschema für statische Haltungen [KILB94, S. 61]**

Statische Haltung	
Risiko	Dauer [s]
1	0 - < 30
3	30 - < 60
4	≥ 60

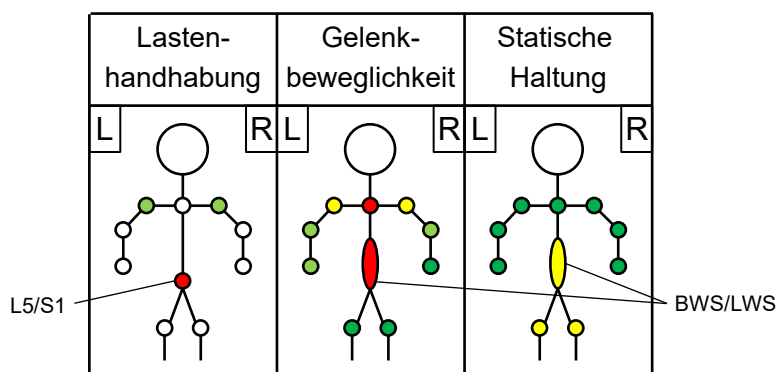
## 5.5 Ergonomische Gesamtbewertung

Mithilfe der zuvor vorgestellten Kennzahlen und Bewertungsschemata ist es möglich, jeden Datenpunkt einer Arbeitsplatzaufnahme zu bewerten. Dieser Abschnitt stellt vor, wie aus diesen eine Gesamtbewertung für einen Arbeitsplatz abgeleitet werden kann. Da jeder Arbeitsplatz für jeden Mitarbeiter individuell zu bewerten ist, unterstützt die Gesamtbewertung vier verschiedene Perspektiven:

- Perspektive 1: ein Mitarbeiter und ein Arbeitsplatz
- Perspektive 2: ein Mitarbeiter und mehrere Arbeitsplätze
- Perspektive 3: mehrere Mitarbeiter und ein Arbeitsplatz
- Perspektive 4: mehrere Mitarbeiter und mehrere Arbeitsplätze

**Perspektive 1: ein Mitarbeiter und ein Arbeitsplatz.** Die erste Perspektive betrachtet die Aufnahme eines Mitarbeiters an einem Arbeitsplatz. Die Visualisierung der Analyseergebnisse soll es ermöglichen, auf den ersten Blick zu erkennen, welche Belastung für einen Mitarbeiter zu einer Überbeanspruchung führt. Ausschlaggebend sind neben der Risikobewertung die Belastungsart und die Körperregion, in der die Überbeanspruchung auftritt. Aus diesem Grund visualisiert die Methode die Ergebnisse der ergonomischen Risikobewertung jeder Körperregion für jede der drei Belastungsarten separat.

Abbildung 5-3 zeigt eine beispielhafte Arbeitsplatzbewertung einer Industrieannahme, deren Analyse in Abschnitt 7.2 näher beschrieben wird.



**Abbildung 5-3: Arbeitsplatzbewertung für einen Mitarbeiter angelehnt an eine Industrieannahme in Anlehnung an [OHLE21, S. 61]**

Jede Körperregion wird anhand ihrer ergonomischen Risikobewertung nach dem etablierten Ampelsystem eingefärbt:

- Lastenhandhabung: Die Visualisierung der Beanspruchung durch Lastenhandhabung erfolgt nach der höchsten auftretenden Risikokategorie, da bereits kurz auftretende Überbeanspruchungen zu Schäden am Muskel-Skelett-System führen können. Da die Methode lediglich Belastungskennwerte für die Schultern und L5/S1 berechnet, sind nur diese Körperbereiche eingefärbt. In dem Beispiel hebt der Mitarbeiter wiederholt Objekte von einer Palette. Das wirkende Last- und Körpergewicht führt mindestens während einer Bewegung zu einem überhöhten L5/S1-Moment.
- Gelenkbeweglichkeit: Die Bewertung der Beanspruchung an die Gelenkbeweglichkeit erfolgt nach dem zeitlichen Bewertungsschema (vgl. Tabelle 5-5). Auch hier ist die Überbeanspruchung auf das vorgebeugte Heben von der Palette zurückzuführen. Die wiederholte Bewegung führt zu einem hohen Zeitanteil in vorgebeugter Haltung. In diesen Arbeitsschritten sind zudem eine hohe Flexion der Schulter und eine hohe Extension der HWS aufgetreten.

- Statische Haltung: Da statische Muskelarbeit die ungünstigste Form der Muskelarbeit ist, erfolgt die Visualisierung nach der höchsten auftretenden Risikokategorie. In dem Beispiel stand der Mitarbeiter beim Ausfüllen von Dokumenten für mehr als 30 Sekunden, ohne seine Wirbelsäule und Knie zu bewegen. Zeigt die Methode ein hohes Risiko auf, ist die Intensität der statischen Haltung im Einzelfall näher zu betrachten. Neutrale Gelenkwinkel und ein Abstützen des Mitarbeiters reduzieren beispielsweise die Intensität und eine Intervention ist nicht immer erforderlich.

Mithilfe von Abbildung 5-3 ist somit direkt ersichtlich, welche Körperbereiche ein Arbeitsplatz besonders beansprucht und welche Belastungsart dies verursacht. Über die Risikokategorien kann ein Unternehmen die Notwendigkeit für ergonomische Maßnahmen für einen Mitarbeiter an einem Arbeitsplatz erkennen. Da diese Darstellung kein ergonomisches Fachwissen erfordert, ist sie besonders dazu geeignet, die Analyseergebnisse mit Personen zu teilen, die nicht in der Methode geschult sind. Ein möglicher Einsatz ist zum Beispiel das Feedback-Gespräch mit dem aufgenommenen Mitarbeiter.

**Perspektive 2: ein Mitarbeiter und mehrere Arbeitsplätze.** Perspektive 2 vergleicht die Analyseergebnisse eines Mitarbeiters an mehreren Arbeitsplätzen. Tabelle 5-7 bildet hierzu die Gesamtbewertungen der Arbeitsplätze tabellarisch ab und bestimmt belastungsartübergreifend die Anzahl der Körperbereiche für die jeweiligen Risikokategorien. Der Methodenanwender kann mit dieser Kennzahl bestimmen, an welchen Arbeitsplätzen das ergonomische Risiko erhöht ist und Verbesserungsbedarf besteht. Die in Abbildung 5-3 dargestellte Bewertung entspricht hier AP 1. Das übergeordnete Ziel ist es, jeden Arbeitsplatz so zu gestalten, dass jeder Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz arbeiten kann. Ist dies aus technologischen Gründen oder auch aufgrund individueller Einschränkungen des Mitarbeiters nicht möglich, kann ein Unternehmen mit Tabelle 5-7 einen fähigkeitsgerechten Einsatz planen. Ein Mitarbeiter sollte in diesem Fall nur an den Arbeitsplätzen arbeiten, an denen keine Überbeanspruchung auftritt.

**Tabelle 5-7: Vergleich der Aufnahmen eines Mitarbeiters an mehreren Arbeitsplätzen mit beispielhaften Werten**

	HWS	Schulter				Ellenbogen		Handgelenk		BWS/LWS			Knie		Σ	Σ	Σ	Σ
	GBW	GBW		GM		GBW		GBW		GBW	GM	WKK	GBW					
		L	R	L	R	L	R	L	R				L	R				
AP 1	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green	4	6	0	4
AP 2	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	5	8	1	0
AP 3	Red	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green	4	5	2	3
AP 4	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	6	8	0	0
AP 5	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	3	6	5	0

AP: Arbeitsplatz; HWS: Halswirbelsäule; BWS/LWS: Brust- und Lendenwirbelsäule  
 GBW: Gelenkbeweglichkeit; GM: Gelenkmoment; WKK: Wirbelsäulenkompressionskraft

**Perspektive 3: mehrere Mitarbeiter und ein Arbeitsplatz.** Hat ein Unternehmen mehrere Mitarbeiter an einem Arbeitsplatz aufgenommen, vergleicht Perspektive 3 die jeweiligen Analyseergebnisse. Da die Methode jeden Arbeitsplatz für jeden Mitarbeiter anhand der individuellen Fähigkeiten und Bewegungsabläufe bewertet, ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse, obwohl die Arbeitsaufgabe und -umgebung für alle gleich ist. Um zu bewerten, ob eine Überbeanspruchung am Arbeitsplatz für einen Großteil der Mitarbeiter vorliegt oder nur für einzelne Mitarbeiter, summiert Tabelle 5-8 die Anzahl der Mitarbeiter für jeden Körperbereich und jede Belastungsart. Damit können Unternehmen bestimmen, ob ein allgemeiner, individueller oder kein Maßnahmenbedarf an einem Arbeitsplatz besteht. Die Ableitung von expliziten Maßnahmen erfordert es, die jeweiligen Prozessschritte und deren ergonomische Risikobewertung detailliert zu betrachten.

Tabelle 5-8 greift das Beispiel aus Perspektive 1 auf und zeigt die Bewertungen für weitere Mitarbeiter. Ein Großteil der Mitarbeiter hat ebenfalls Probleme mit der Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit der HWS und der BWS/LWS. Außerdem ist eine Überbeanspruchung des unteren Rückens und der rechten Schulter infolge von Lastenhandhabung wahrscheinlich. In diesen Fällen besteht ein allgemeiner Maßnahmenbedarf. Tritt eine Überbeanspruchung hingegen nur bei einzelnen Mitarbeitern auf, ist davon auszugehen, dass dies auf die Anthropometrie, die Fähigkeiten oder die Arbeitsweise des Mitarbeiters in Kombination mit den Gegebenheiten am Arbeitsplatz zurückzuführen ist. Demnach besteht in diesem Fall ein individueller Maßnahmenbedarf. Ist die Beanspruchung der Mitarbeiter als gering zu bewerten, ist kein Maßnahmenbedarf zu identifizieren. Die Grenzen für einen allgemeinen und einen individuellen Maßnahmenbedarf kann ein Unternehmen selbst definieren. Beeinflussende Faktoren sind beispielsweise die Anzahl der Mitarbeiter oder auch die Größenunterschiede zwischen den Mitarbeitern.

**Tabelle 5-8: Allgemeiner, individueller oder kein Maßnahmenbedarf an einem Arbeitsplatz in Anlehnung an [OHLE21, S. 65]**

	HWS	Schulter				Ellenbogen		Handgelenk		BWS/LWS			Knie	
	GBW	GBW		GM		GBW		GBW		GBW	GM	WKK	GBW	
		L	R	L	R	L	R	L	R				L	R
MA 1	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green
MA 2	Yellow	Green	Yellow	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green
MA 3	Red	Yellow	Red	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green
MA 4	Red	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green
MA 5	Yellow	Red	Green	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green
	↓	↓				↓		↓		↓			↓	
Σ	0	0	1	0	0	1	0	0	5	0	0	1	5	5
Σ	0	3	2	2	0	4	5	5	0	1	0	0	0	0
Σ	3	1	1	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Σ	2	1	1	0	5	0	0	0	0	4	4	4	0	0
A, I, K	A	I	I	K	A	K	K	K	K	A	A	A	K	K

MA: Mitarbeiter; HWS: Halswirbelsäule; BWS/LWS: Brust- und Lendenwirbelsäule  
 GBW: Gelenkbeweglichkeit; GM: Gelenkmoment; WKK: Wirbelsäulenkompressionskraft  
 A: Allgemeiner Maßnahmenbedarf; I: Individueller Maßnahmenbedarf; K: Kein Maßnahmenbedarf

**Perspektive 4: mehrere Mitarbeiter und mehrere Arbeitsplätze.** Perspektive 4 betrachtet mehrere Mitarbeiter an mehreren Arbeitsplätzen. Wie zuvor bereits erwähnt ist eine Aufnahme aller Mitarbeiter an allen Arbeitsplätzen sehr aufwendig. Aus diesem Grund ist das Vorgehen für Produktionsbereiche mit wenigen Mitarbeitern oder für eine Analyse der Arbeitsplätze mittels Bewegungstransformation zu empfehlen.

Liegen die Analyseergebnisse mehrerer Mitarbeiter für mehrere Arbeitsplätze vor, kann der Methodenanwender den Anteil der Mitarbeiter bestimmen, die an dem Arbeitsplatz mindestens eine kritische Körperhaltung einnehmen. Eine kritische Körperhaltung kann je nach Anwendungsfall unterschiedlich definiert werden: Naheliegend ist, eine Körperhaltung als kritisch zu definieren, wenn in mindestens einer der Belastungsarten ein hohes Risiko an mindestens einem Körperbereich vorliegt. Analog ist es möglich, die Belastungsarten und Körperbereiche separat zu betrachten.

Tabelle 5-9 zeigt eine beispielhafte Auswertung von fünf Mitarbeitern an sieben Arbeitsplätzen. Für jeden Mitarbeiter und Arbeitsplatz ist das entsprechende Feld nach der kritischsten Risikobewertung eingefärbt, die am Arbeitsplatz auftritt. Sortiert man die Arbeitsplätze nach der Anzahl der Mitarbeiter mit einer kritischen Arbeitsplatzbewertung, erhält man eine Rangliste, mit der Unternehmen ergonomische Maßnahmen priorisieren können. Im Beispiel wäre es also sinnvoll, den Fokus auf Arbeitsplatz 1 zu legen und eine

Analyse aus Perspektive 3 durchzuführen (ein Arbeitsplatz und mehrere Mitarbeiter, vgl. Tabelle 5-8). Erstellt man die Ranglisten für einzelne Belastungsarten oder Körperbereiche, können Unternehmen zudem explizite Ansatzpunkte für die tiefergehende Analyse identifizieren.

**Tabelle 5-9: Priorisierung von Arbeitsplätzen für ergonomische Maßnahmen mit beispielhaften Werten**

	AP 1	AP 2	AP 3	AP 4	AP 5	AP 6	AP 7
MA 1							
MA 2							
MA 3							
MA 4							
MA 5							
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Σ	5	1	1	0	0	0	0
MA: Mitarbeiter; AP: Arbeitsplatz							

### 5.6 Maßnahmenableitung

Hat ein Unternehmen einen Arbeitsplatz für eine ergonomische Intervention ausgewählt, kann es anschließend Verbesserungsmaßnahmen aus den Ergebnissen ableiten, die nach dem TOP-Prinzip der Prävention zu priorisieren sind (TOP = Technisch, Organisatorisch, Personenbezogen). Es besagt, dass technische Maßnahmen im ergonomischen Interventionsprozess Vorrang haben sollen. Sind technische Maßnahmen (z. B. Arbeitsplatzgestaltung) nicht umsetzbar, ist in einem nächsten Schritt die Umsetzung organisatorischer (z. B. Job-Rotation) und dann personenbezogener Maßnahmen (z. B. Qualifizierung, Unterweisung) zu prüfen (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Nach [BRAN16] setzt sich der Input des ergonomischen Interventionsprozesses aus dem aktuellen Belastungszustand und dessen ergonomischer Bewertung zusammen. Daraus folgt, dass mögliche Arbeitsplatzverbesserungen nach der betroffenen Zielregion (HWS, Schultern, Ellenbogen, Handgelenke, BWS/LWS und Knie) klassifiziert werden müssen, um gezielt ergonomische Maßnahmen zu empfehlen. So kann beispielsweise eine Überbeanspruchung der Wirbelsäule andere Maßnahmen erfordern als eine Überbeanspruchung der Knie. Der Maßnahmenkatalog differenziert daher zwischen den sechs untersuchten Zielregionen.

Die ergonomischen Maßnahmen für jede Zielregion sind nach den Belastungsarten gegliedert, so dass der Fokus gezielt auf die jeweiligen Belastungsschwerpunkte gerichtet werden kann. Bei der Betrachtung der Gelenkbeweglichkeit liegt der Fokus vor allem auf

der Häufigkeit der Bewegungen sowie der Intensität, also der Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit.

Bei den Maßnahmen für statische Haltungen liegt der Fokus auf der Dauer bestimmter Haltungen. Hier kann ein Unternehmen z. B. Armstützen installieren, um die statische Belastung der Muskulatur zu reduzieren. Auch die Intensität ist ein Gestaltungsfaktor für statische Haltungen, denn statische Haltungen mit neutralen Gelenkwinkeln stellen ein geringes ergonomisches Risiko dar.

Bei den Gelenkmomenten und der Wirbelsäulenkompressionskraft liegt der Schwerpunkt der Maßnahmen auf der Verringerung der Intensität, die entweder durch eine Reduzierung der äußeren Belastung oder durch eine Verbesserung der Körperhaltung gesenkt werden kann. Ein weiterer Faktor sind das Körpergewicht und die Größe der Mitarbeiter. Mitarbeiter mit hohem Körpergewicht und langen Hebelarmen sind größeren Gelenkmomenten ausgesetzt. Eine Intervention vonseiten des Unternehmens ist hier jedoch nur bedingt möglich.

Innerhalb der einzelnen Belastungsarten werden die ergonomischen Maßnahmen nach dem TOP-Prinzip der Prävention angegeben. Dies ermöglicht eine umfassende Betrachtung des Arbeitssystems und seiner ergonomischen Gestaltung. Zu beachten ist, dass keine Unterscheidung zwischen allgemeinen und individuellen Maßnahmen getroffen wird, da die meisten Maßnahmen als allgemeine oder individuelle Maßnahme interpretiert und umgesetzt werden können. So kann beispielsweise eine Anpassung der Materialbereitstellung individuell für einen Mitarbeiter erfolgen, aber auch als allgemeine Gestaltungsmaßnahme für alle Mitarbeiter umgesetzt werden.

Tabelle 5-10 zeigt ein Beispiel für zusammengestellte Maßnahmen für die Zielregion BWS/LWS. Es ist zu beachten, dass die Maßnahmensammlung keinen vollständigen Überblick darstellt. Je nach untersuchtem Bereich gibt es immer unterschiedliche Technologien oder Automatisierungsgrade, die unterschiedliche Ansätze für die ergonomische Intervention erfordern. Ein allgemeiner Ansatz zur Empfehlung von Maßnahmen, der alle Eventualitäten berücksichtigt, ist daher nicht möglich. Der Katalog wächst somit von einem ergonomischen Interventionsprozess zum nächsten und ist mit neuen Maßnahmen zu erweitern. Zu beachten ist auch, dass es gerade im Bereich der organisatorischen Maßnahmen große Überschneidungen zwischen den einzelnen Zielregionen gibt, da diese oft nicht direkt auf ein bestimmtes Gelenk einwirken, sondern eher für eine allgemeine Belastungsreduktion sorgen. So können beispielsweise Maßnahmen wie Job-Rotation, Pausenmanagement oder Unterweisung in ergonomischem Verhalten auf alle Zielregionen angewendet werden. Die Maßnahmenkataloge aller Zielregionen sind in Anhang A zu finden.

**Tabelle 5-10: Maßnahmenkatalog für Belastungen der BWS/LWS in Anlehnung an [OHLE21, S. 109-110]**

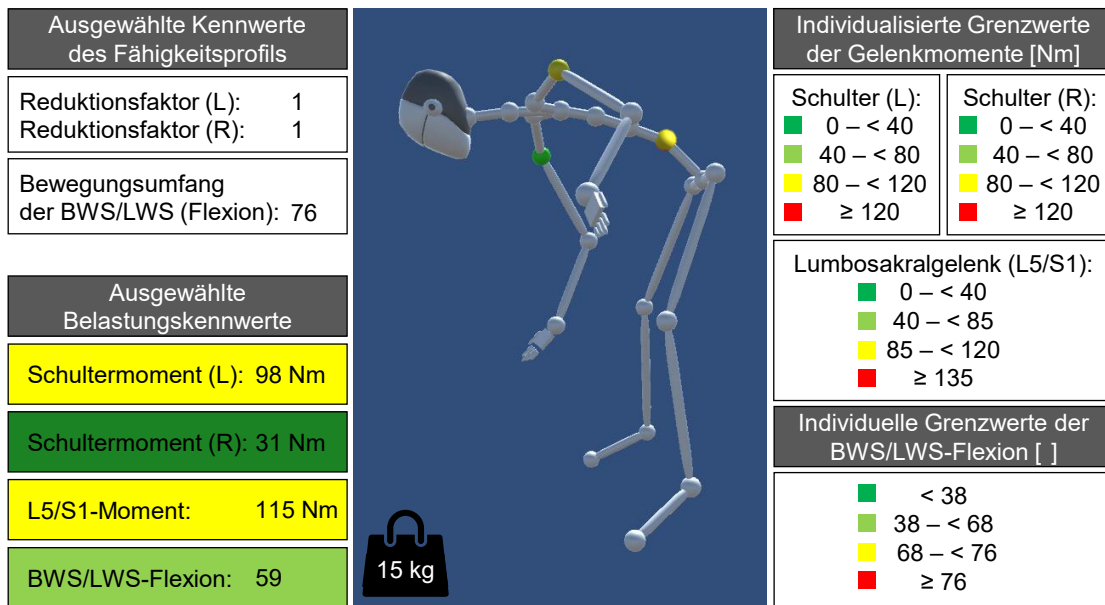
<b>Brust- und Lendenwirbelsäule</b>		
<b>Ziele: Vermeidung von Arbeiten mit Rumpfbeugehaltung/Vermeidung von häufiger und intensiver Rotation und Lateralflexion/Minimierung der äußeren Lasteinwirkung (L5/S1-Moment und Wirbelsäulenkompressionskraft)</b>		
<b>Belastungsart</b>	<b>TOP-Prinzip</b>	<b>Maßnahmen</b>
<b>Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit</b>  (Fokus: Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
		2. Hebehilfe zur Verfügung stellen (z. B. Hubwagen, Deckenkran, ...)
		3. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		4. Frontale Anordnung der Arbeits- und Greifbereiche (Rotation vermeiden)
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (auch bei indiv. Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
...		
<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Rotation des Oberkörpers vermeiden	
	2. Aus den Beinen heben	
	...	
<b>Statische Haltung</b>  (Fokus: Dauer ergonomisch ungünstiger Haltungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Oberkörper-/Armstützen installieren
		2. Arbeitshöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
		3. Bildschirme, Anleitungen etc. auf Augenhöhe anbringen
		4. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (auch bei indiv. Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
...		
<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Hilfsmittel nutzen	
	2. Regelmäßige Haltungsänderungen fördern	
	...	
<b>Lastenhandhabung</b>  (Fokus: Intensität der Lastwirkung reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
		2. Hebehilfe zur Verfügung stellen (z. B. Hubwagen, Deckenkran, ...)
		3. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		4. Handwagen für längere Transportwege zur Verfügung stellen
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (auch bei indiv. Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
...		
<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Unterweisung der Mitarbeiter (z. B. aus den Beinen heben, Last nah am Körper bewegen, Hilfsmittel nutzen, ...)	
	2. Sport und Training fördern	
	...	

### 5.7 Evaluation

Bei der entwickelten Arbeitsplatzanalyse steht die Individualität der ergonomischen Bewertung im Vordergrund. Die Methode bietet nur einen Mehrwert gegenüber den existierenden Screening-Verfahren, wenn sie die individuellen Fähigkeiten aus der Fähigkeitsanalyse berücksichtigt. Dementsprechend ist das Ziel der Evaluation, zu überprüfen, ob sich die Methode dazu eignet, die Belastung am Arbeitsplatz individuell zu bewerten. Hierzu ist nachfolgend beispielhaft die Bewertung einer Körperhaltung mit unterschiedlichen Fähigkeitsprofilen beschrieben. Darüber hinaus sollen die Analyseergebnisse Unternehmen bei der Maßnahmenableitung unterstützen. Im Anschluss wird daher geprüft, ob der Maßnahmenkatalog mindestens eine valide Abstellmaßnahme für die beispielhafte Haltung enthält. Eine tiefergehende Anwendung der Analyse in der Industrie folgt in Abschnitt 7.

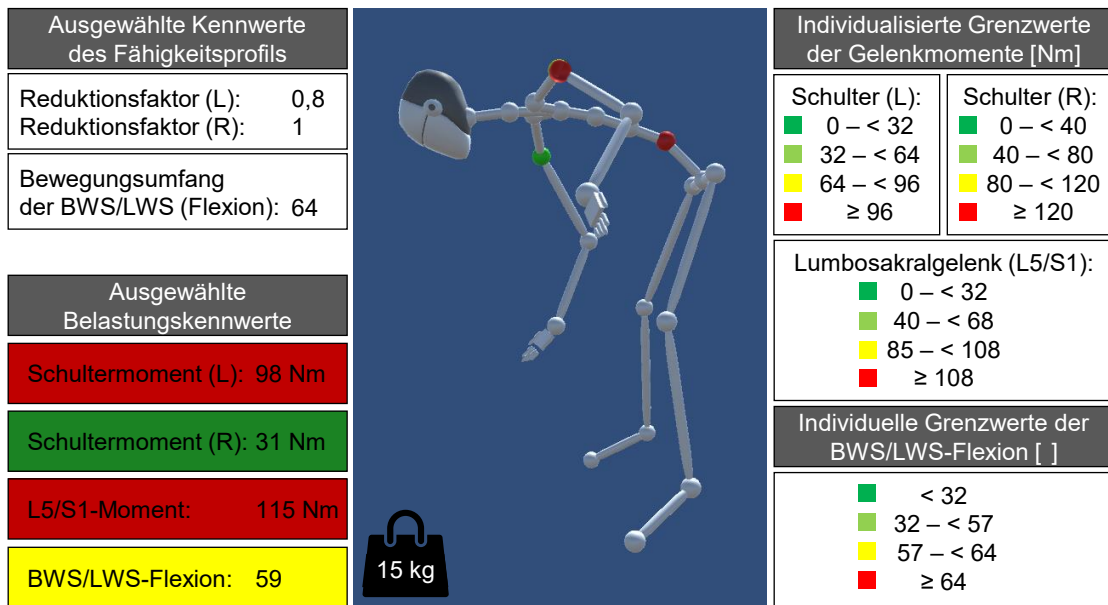
Die Evaluation der ergonomischen Zusammenhänge ist kein Bestandteil dieser Arbeit. Da die Berechnungs- und Bewertungsmethoden, auf denen diese Arbeit aufbaut, bereits evaluiert sind, ist eine der grundlegenden Annahmen, dass ihre Verwendung ergonomisch korrekt ist. Für eine industrielle Anwendung sind weiterführende Studien notwendig, die diese Annahme evidenzbasiert bestätigen.

Abbildung 5-4 greift den Beispielprozess aus Abschnitt 5.4 auf und zeigt mittig das DMM eines Mitarbeiters beim beidhändigen Heben eines Objekts mit einem Gewicht von 15 kg von einer Palette. Die Schultergelenke und L5/S1 sind gemäß der Gelenkmomentbewertung eingefärbt. Um die Komplexität zu reduzieren, sind auf der linken Seite lediglich ausgewählte Kennwerte des Fähigkeitsprofils und darunter Kennwerte zur Arbeitsplatzbewertung aufgeführt. Die ausgewählten Kennwerte des Fähigkeitsprofils zeigen keine Einschränkungen auf. Sowohl die gemessenen Handgriffkräfte als auch der Bewegungsumfang der BWS/LWS liegen im Normbereich eines gesunden Menschen. Die Grenzwerte der Gelenkmomente entsprechen somit den globalen Grenzwerten und die Grenzwerte zur Bewertung der Gelenkbeweglichkeit ergeben sich nach Tabelle 5-4 (vgl. Abbildung 5-4, rechts). Bewertet man die Belastungssituation anhand dieser Grenzwerte, resultiert ein erhöhtes ergonomisches Risiko für die linke Schulter und L5/S1 aufgrund der Lastenhandhabung. Das Gelenkmoment der rechten Schulter und die Bewertung der BWS/LWS-Flexion liegen in einem akzeptablen Bereich. Aus der ergonomischen Bewertung folgt, dass Maßnahmen zur Gestaltung und zur Prävention zu prüfen sind.



**Abbildung 5-4: Bewertung einer Beispielhaltung eines Mitarbeiters ohne körperlicher Einschränkung beim beidhändigen Heben von 15 kg in Anlehnung an [BROS22, S. 26]**

Abbildung 5-5 zeigt dieselbe Belastungssituation, d. h. alle äußeren Umstände sind gleich und auch die anthropometrischen Daten des DMM stimmen überein. Der Unterschied zur vorherigen Bewertung liegt lediglich in dem hinterlegten Fähigkeitsprofil. Die linke Handgriffkraft liegt in diesem Beispiel unter dem alters- und geschlechtsspezifischen Referenzwert und führt zu einem Reduktionsfaktor von 0,8. Entsprechend sind die Grenzwerte zur Bewertung der Gelenkmomente der linken Schulter und L5/S1 um diesen Faktor reduziert. Auch der Flexionswinkel der BWS/LWS liegt unter dem unteren Normwert, weshalb die individuellen Grenzwerte der BWS/LWS-Flexion ebenfalls niedriger liegen als im obigen Beispiel (vgl. Abbildung 5-5, rechts). Nach dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept führt dies dazu, dass das ergonomische Risiko höher ist, obwohl dieselbe Belastung wirkt. Die linke Schulter und L5/S1 sind aufgrund des wirkenden Gelenkmoments einem hohen Risiko ausgesetzt, eine MSE zu erleiden. Somit sind Gestaltungs- und Präventionsmaßnahmen nicht nur zu prüfen, sondern notwendig. Auch die Bewertung der Gelenkbeweglichkeit der BWS/LWS-Flexion resultiert in einer höheren Risikokategorie.



**Abbildung 5-5: Bewertung einer Beispielhaltung eines Mitarbeiters mit leichten körperlichen Einschränkungen beim beidhändigen Heben von 15 kg in Anlehnung an [BROS22, S. 26]**

Der Unterschied zwischen den beiden Beispielen zeigt, dass eine individuelle Bewertung der Arbeitsplatzbelastung möglich ist. Über die Individualisierung der Grenzwerte können somit Belastungssituationen erkannt werden, die eingeschränkte Mitarbeiter überbeanspruchen, aber von globalen Grenzwerten nicht als kritisch erkannt worden wären. Auch wenn sich die Risikokategorien in diesem Beispiel lediglich um eine Risikokategorie erhöhen, ist es offensichtlich, dass belastungsarme Prozessschritte ein hohes Risiko für Mitarbeiter mit größeren individuellen Einschränkungen darstellen können.

Aus der Bewertung der Beispielhaltung folgt, dass das Gelenkmoment an der linken Schulter und L5/S1 zu reduzieren ist. Ein Blick in die entsprechende Kategorie der Maßnahmenkataloge zeigt, dass mehrere Maßnahmen die Belastung potenziell verringern können. Ein Unternehmen sollte die Einführung unter Anwendung des TOP-Prinzips prüfen:

- T: Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
- T: Hebehilfe zur Verfügung stellen (z. B. Hubwagen, Deckenkran, ...)
- P: Unterweisung der Mitarbeiter (z. B. aus den Beinen heben, Hilfsmittel nutzen)

Die Lösung für dieses Beispiel enthält alle drei Maßnahmen. Das Unternehmen hat beschlossen, den vorhandenen elektrischen Hubwagen an dem betroffenen Arbeitsplatz abzustellen und die Mitarbeiter erneut zur Nutzung zu unterweisen. Durch das Hochfahren

der Palette erhöht sich die Arbeitshöhe und die Mitarbeiter können das Gewicht körpernah aufheben. Dies führt zu einer Reduktion der Gelenkmomente und einer geringeren BWS/LWS-Flexion.

### 6 Erzeugung individueller Bewegungsabläufe

Um die Analyse ganzer Produktionsbereiche oder Unternehmen zu ermöglichen, ist die Erzeugung individueller Bewegungsabläufe notwendig. Nur so ist eine individuelle Bewertung mit vertretbarem Aufwand möglich. Ziel dieses Kapitels ist daher, auf Basis einer Bewegungsaufnahme am Arbeitsplatz Bewegungsabläufe für Mitarbeiter anderer Körpermaße zu erstellen. Hierzu detailliert Abschnitt 6.1 die Anforderungen an die Erzeugung individueller Bewegungsabläufe. Die weiteren Abschnitte beschreiben das Konzept zur Bewegungstransformation (Abschnitt 6.2), die hierdurch möglichen neuen Wege zur Maßnahmenableitung (Abschnitt 6.3) und die Evaluation der durch die Transformation erzeugten Bewegungsabläufe (Abschnitt 6.4).

#### 6.1 Detaillierung der Anforderungen

Die Bewertung der Arbeitsplatzbelastung hängt maßgeblich von den Körperhaltungen ab, die ein Mitarbeiter am Arbeitsplatz einnimmt. Ziel der Bewegungstransformation ist es, individuelle Bewegungsabläufe für die Körpermaße der zu analysierenden Mitarbeiter zu erstellen, mit denen ein Mitarbeiter die Arbeitsaufgabe erfüllen kann. Um diese Anforderung zu detaillieren, wurden in Arbeitsplatzbesichtigungen die Bewegungsabläufe betrachtet und analysiert.

##### A5.1: Erzeugung realistischer Bewegungsabläufe

Allgemein hat die Untersuchung betrieblicher Arbeitsabläufe gezeigt, dass sich die Bewegungen am Arbeitsplatz für die gleiche Arbeitsaufgabe zum Teil stark unterscheiden – sowohl zwischen den Mitarbeitern als auch zwischen den wiederholten Ausführungen eines Mitarbeiters. Diese unterschiedlichen Bewegungsstrategien sind ein bekanntes Problem [z. B. KÖNE12; PETE19] und machen es unmöglich, durch Bewegungstransformation einen Bewegungsablauf zu erzeugen, der die realen Bewegungsabläufe aller Mitarbeiter oder aller Ausführungen eines Mitarbeiters exakt abbildet. Als Anforderung folgt, dass der Bewegungsablauf realistisch ist. Insbesondere sollte er dazu unnatürliche Bewegungen vermeiden und alle vom Arbeitsplatz und von der Arbeitsaufgabe vorgegebenen Punkte erreichen.

##### A5.2: Abbildung der tatsächlichen Arbeitsabläufe

Weiterhin haben die Arbeitsplatzbesichtigungen gezeigt, dass die tatsächliche Ausführung der Bewegungen zum Teil von der Arbeitsanweisung abweicht, beispielsweise indem ein Mitarbeiter vorhandene Hilfsmittel nicht nutzt. Da die gleichen Abweichungen vom Standard bei verschiedenen Mitarbeitern beobachtet wurden, ist in diesen Fällen da-

von auszugehen, dass ein mangelhaft gestalteter Arbeitsplatz oder die Schulung der Mitarbeiter hierfür ursächlich sind. Es folgt die Anforderung, dass der Bewegungsablauf den tatsächlichen Arbeitsstandard widerspiegeln soll.

### A5.3: Arbeitsplatzaufnahme als Grundlage zur Erzeugung der Bewegungsabläufe

Die Grundlage für den zu generierenden Bewegungsablauf soll die Arbeitsplatzaufnahme bilden. Als Datenbasis sollen demnach die kinematischen Daten des aufgenommenen Mitarbeiters ausreichen. Ziel ist es, Konformität zur Arbeitsplatzanalyse und einen geringen Aufwand zu erreichen.

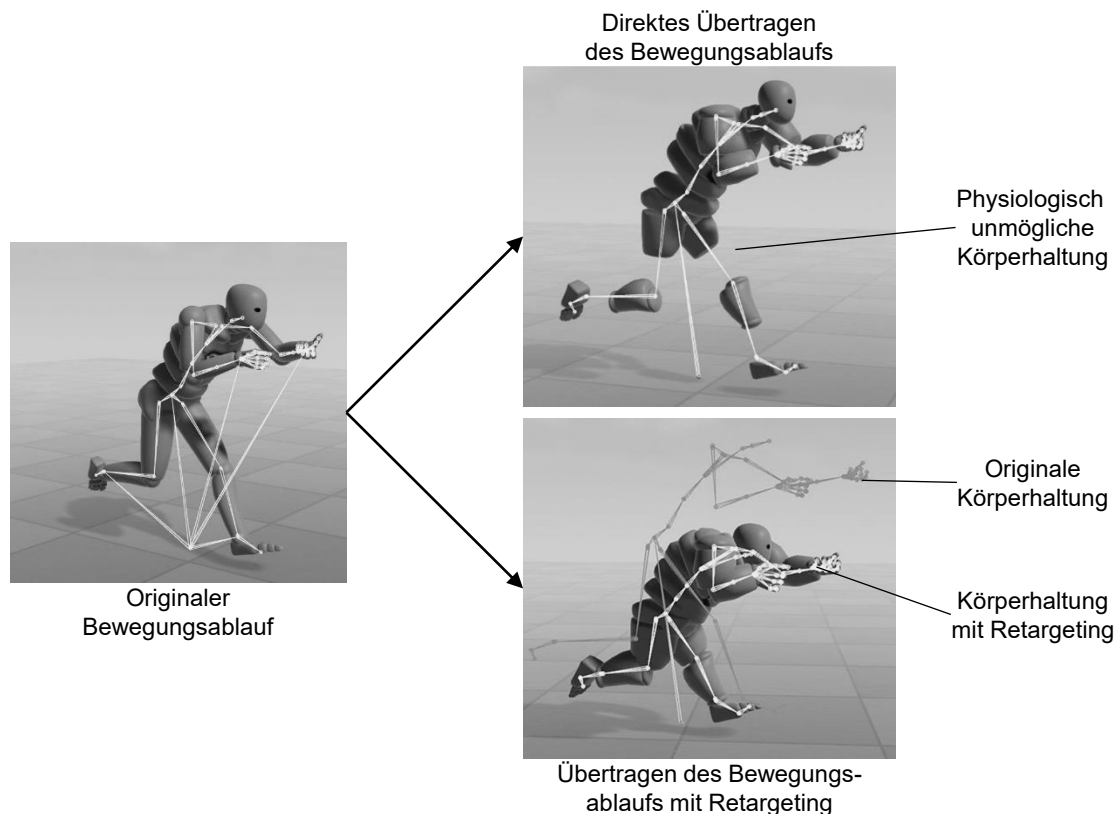
## **6.2 Bewegungstransformation**

Dieser Abschnitt beschreibt die Bewegungstransformation. Abschnitt 6.2.1 stellt hierzu das grundlegende Konzept zur Bewegungstransformation vor. Abschnitt 6.2.2 zeigt anschließend auf, wie ein Algorithmus Bewegungen identifiziert, die von der Transformation auszuschließen sind und Abschnitt 6.2.3 beschreibt die Erzeugung der individuellen Bewegungsabläufe.

### **6.2.1 Konzept zur Bewegungstransformation**

Um für jeden Mitarbeiter einen individuellen Bewegungsablauf zu erstellen, ist der aufgezeichnete Bewegungsablauf gemäß der individuellen Körpermaße zu transformieren. Aufgrund von Unterschieden in der Kinematik (z. B. Länge der Körperteile) und Dynamik (z. B. Trägheit) ist es nicht möglich, die Positions- und Rotationsdaten direkt auf die jeweiligen Körpersegmente zu übertragen, weil dies zu unrealistischen Bewegungen führen würde.

Abbildung 6-1 zeigt dies am Beispiel der Übertragung eines Bewegungsablaufs auf einen kleineren Avatar. Eine direkte Übertragung der Positionsdaten der Körpersegmente trennt die Körpersegmente voneinander (Abbildung 6-1, rechts oben). Ein bewährter Ansatz, um Bewegungen auf Menschmodelle anderer Körpermaße zu übertragen, ist das sog. *Retargeting*. Es findet vor allem in der Spiele-Entwicklung Anwendung, um Animationen eines Avatars auf Avatare mit anderen Körpermaßen zu übertragen. Das Retargeting sorgt zwar für eine realistische Körperhaltung, allerdings erreicht diese nicht mehr dieselben Positionen aus dem originalen Bewegungsablauf (Abbildung 6-1, rechts unten).



**Abbildung 6-1: Übertragen eines Bewegungsablaufs auf ein DMM mit geringeren Körpermaßen ohne und mit Retargeting in Anlehnung an [UNRE23]**

Diese Arbeit verwendet die Retargeting-Funktion des *Mecanim Animation Systems* der Game Engine *Unity*, um die originale Bewegungsaufnahme auf Menschmodelle unterschiedlicher Körpergröße zu übertragen. Hierzu ist die Bewegungsaufnahme als Animation im FBX-Dateiformat in den Software-Prototypen zu importieren und das Menschmodell als humanoider Charakter zu definieren. Da *Unity* zur Darstellung der Wirbelsäulenbewegung einen Datenpunkt weniger verwendet als das XSens-Modell, erzeugt das *Mecanim Animation System* eine Animation auf Basis der kinematischen Daten, ohne das T12-Segment der Wirbelsäule zu verwenden. Dies führt zwar zu einem Genauigkeitsverlust bei der digitalen Abbildung der Wirbelsäule, jedoch ist die Auswirkung auf Analyseergebnisse gering, weil die Daten dieses Segments nicht direkt in die Berechnung der ergonomischen Kennwerte einfließen.

Beim Übertragen eines Bewegungsablaufs mit *Retargeting* erreichen die DMM im transformierten Bewegungsablauf jedoch nicht mehr die absoluten Positionen und Rotationen der Originalanimation. Dieses Verhalten ist auch in Abbildung 6-1 zu sehen: Retargeting führt zwar zu einer realistischen Körperhaltung ohne unerwünschte Verzerrungen, aber

die Hände erreichen nicht die gleichen Positionen. Damit die Menschmodelle die am Arbeitsplatz erforderlichen Bewegungs- und Rotationsziele erreichen, ist es erforderlich, die Lage der Handgelenke und die Blickrichtung vorgeben zu können. Dies ist mithilfe einer inversen Kinematik möglich, die ausgehend von der Lage die an der Bewegung beteiligten Gelenke einstellen kann (vgl. Abschnitt 2.4.2). Diese Arbeit nutzt den Inverse-Kinematik-Solver *SAFullbodyIK*, der als Freeware verfügbar ist [STER16].

Da nicht alle Körperhaltungen vom Arbeitsplatz vorgegeben sind, ist es zudem erforderlich, irrelevante Bewegungen von der Bewegungstransformation auszuschließen. Beispielhaft sind hier Körperhaltungen zu nennen, in denen sich die Mitarbeiter im Raum fortbewegen, da der Arbeitsplatz nur den Start- und den Zielpunkt vorgibt. Bewegungsziele der Hände in Form von Fügstellen oder Materialkisten gibt es hingegen nicht.

Abbildung 6-2 zeigt den schematischen Ablauf der Bewegungstransformation. Als Eingangsgrößen erfordert die Bewegungstransformation den Bewegungsablauf, der in der Arbeitsplatzanalyse aufgenommen wurde, und die DMM der Mitarbeiter, für deren Körpermaße die Bewegung transformiert werden soll. Diese werden bereits in der Fähigkeitsanalyse erstellt und im Fähigkeitsprofil gespeichert. Der Software-Prototyp filtert die Bewegungsdaten zunächst und berechnet für alle relevanten Bewegungen die Lage der Handgelenke und die Blickrichtung für jeden Mitarbeiter. Mittels *Retargeting* überträgt die Methode den Bewegungsablauf auf die individuellen DMM der Mitarbeiter. Eine inverse Kinematik passt die Bewegung so an, dass sie die Anforderungen des Arbeitsplatzes erfüllt. Das Ergebnis ist ein transformierter Bewegungsablauf für jeden Mitarbeiter, der anschließend zu einer individuellen Risikobewertung genutzt wird.

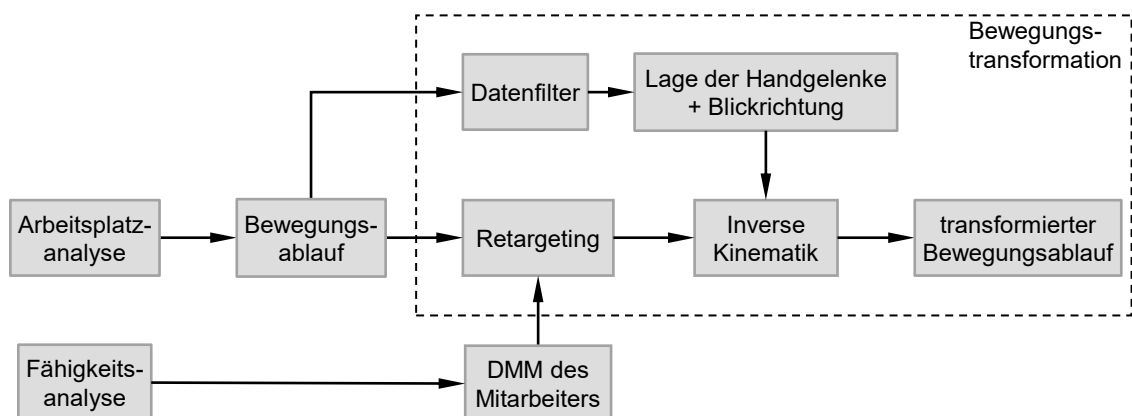


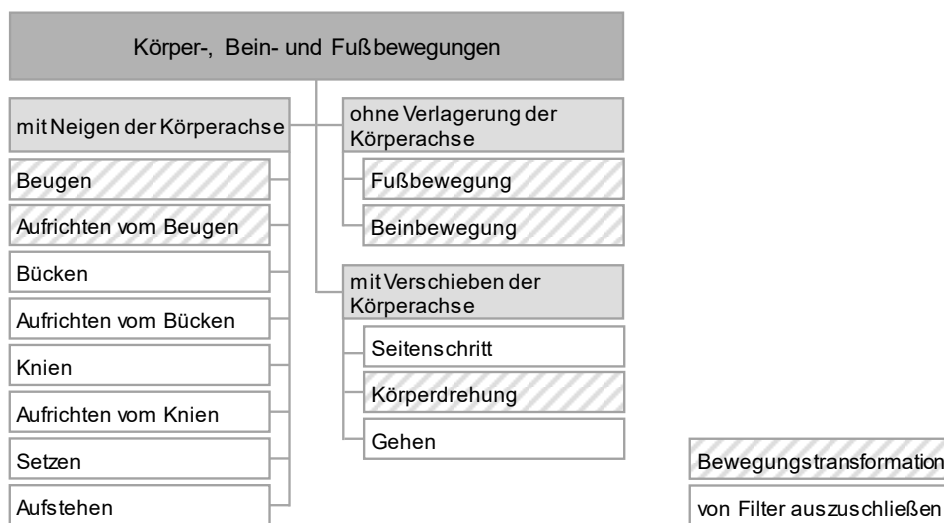
Abbildung 6-2: Schematischer Ablauf der Bewegungstransformation

### 6.2.2 Ausschluss irrelevanter Bewegungen von der Bewegungstransformation

Eine Körperhaltung eines Menschmodells ist nur zu verändern, wenn der Arbeitsplatz die Bewegung vorgibt. Gibt der Arbeitsplatz die Bewegung hingegen nicht vor, soll sich das Menschmodell gemäß der aufgezeichneten Bewegungsdaten bewegen. Ziel dieses Abschnitts ist es daher, die Datenpunkte eines Bewegungsablaufs zu identifizieren und auszusortieren, die keine Bewegungstransformation erfordern.

Die zu transformierenden Bewegungen umfassen in Analogie zur MTM-1-Logik (vgl. Abschnitt 3.1) die *Bewegungen des Hand-Arm-Systems* und die *Blickfunktionen*. Beispielhafte Tätigkeiten sind somit das *Greifen* und *Fügen*, da die Arbeitsaufgabe und die Arbeitsmittel die Handpositionen und Sichtziele vorgeben.

Unterstützende Bewegungen, wie zum Beispiel das *Gehen* beim Materialtransport, sind hingegen aufgrund der Arbeitsaufgabe erforderlich, jedoch kann ein Mitarbeiter sie unabhängig von seinen Körpermaßen gleich ausführen. Demnach soll ein Datenfilter im ersten Schritt Körperhaltungen ausschließen, bei denen sich der Mitarbeiter im Raum bewegt. Hierzu sind die *Körper-, Bein und Fußbewegungen* näher zu betrachten (vgl. Abbildung 6-3).



**Abbildung 6-3: Körper-, Bein und Fußbewegungen, die der Filter ausschließt in Anlehnung an [BOKR12, S. 96]**

*Fuß- und Beinbewegungen ohne Verlagerung der Körperachse* sowie *Körperdrehungen, Beugen* und *Aufrichten vom Beugen* sind in der Regel von erforderlichen Bewegungen des Hand-Arm-Systems überlagert und erfordern daher eine Bewegungstransformation. Mit den übrigen Bewegungen nähert sich ein Mitarbeiter den vorgegebenen Positionen

und führt im Anschluss *Bewegungen des Hand-Arm-Systems* aus, sobald sich das Greifobjekt in seiner Reichweite befindet. Der Datenfilter soll demnach diese Bewegungen erkennen und die Körperhaltungen von der Bewegungstransformation ausschließen.

Die auszuschließenden Bewegungen haben gemeinsam, dass sie eine Translationsbewegung des Beckens erfordern. Um sie datenbasiert zu erkennen, prüft ein Algorithmus für jeden Zeitpunkt, ob die Geschwindigkeit des Beckens über einem Schwellenwert liegt. Die Verwendung der Geschwindigkeit des Beckens hat zwei Vorteile: Zum einen sind kleine Bewegungen des Beckens, die bei Bewegungen des Hand-Arm-Systems auftreten, weiterhin Teil der Bewegungstransformation. Zum anderen kommt es vor, dass ein Mitarbeiter gegen Ende der auszuschließenden Bewegungen bereits zu transformierende Tätigkeiten ausführt. Weil das Becken bereits vor Erreichen der Zielposition abbremst, fällt die Geschwindigkeit unter den Schwellenwert und die Haltung wird nicht vom Filter erfasst. Die Geschwindigkeitsdaten liegen als Geschwindigkeitsvektor vor. Die resultierende Geschwindigkeit berechnet sich somit nach Gleichung (6-1).

$$v_{Becken} = \sqrt{v_{x,Becken}^2 + v_{y,Becken}^2 + v_{z,Becken}^2} \quad (6-1)$$

$v_{Becken}$	<i>Geschwindigkeit des Beckens [m/s]</i>
$v_{x,Becken}$	<i>x-Komponente des Geschwindigkeitsvektors vom Becken [m/s]</i>
$v_{y,Becken}$	<i>y-Komponente des Geschwindigkeitsvektors vom Becken [m/s]</i>
$v_{z,Becken}$	<i>z-Komponente des Geschwindigkeitsvektors vom Becken [m/s]</i>

Für Montage- und Logistkarbeitsplätze hat sich ein Schwellenwert von 0,5 m/s als praktikabel erwiesen, um die o. g. Bewegungen zu identifizieren. Im Einzelfall, z. B. wenn sich ein Mitarbeiter schneller oder langsamer bewegt, kann der Methodenanwender den Schwellenwert anpassen. Die nachfolgend beschriebenen Schritte führt der Software-Prototyp demnach nur aus, wenn die Geschwindigkeit des Beckens unter dem o. g. Schwellenwert liegt.

Neben den Zeitanteilen, in denen sich ein Mitarbeiter in Bewegung befindet, gilt es zudem, neutrale Handpositionen von der Bewegungstransformation auszuschließen, die nicht durch den Arbeitsplatz vorgegeben sind. Greift ein Mitarbeiter beispielsweise einhändig nach Material, so ist die andere Hand nicht an der Erfüllung der Arbeitsaufgabe beteiligt. Diese neutrale Handposition lässt sich im Normalfall mithilfe der Neutral-Null-Stellung beschreiben, d. h. der Arm hängt neutral von der Schulter nach unten und die Hand befindet sich neben der Hüfte (vgl. Abbildung 6-4a).

Um diese neutrale Handposition zu erkennen, definiert der Software-Prototyp eine Kugel mit einem Radius von 20 cm. Ihr Mittelpunkt bestimmt sich aus der Identity-T-Pose (vgl. Abbildung 4-3). Im ersten Schritt berechnet sich mit Gleichung (4-3) der Vektor zwischen

Hand- und Schultergelenk. In der T-Pose ist der Arm ausgestreckt und der Betrag des Vektors entspricht somit der Armlänge ohne Hand. Der Mittelpunkt der Kugel in der Neutral-Null-Stellung ( $\vec{K}_{NNS}$ ) ergibt sich somit nach Gleichung (6-2). Weil ein Mitarbeiter nicht nur aufrecht stehend arbeitet, folgt mit Gleichung (6-3) die Position des Kugelmittelpunkts relativ zum Becken ( $\overline{BK}_{NNS}$ ). In der Identity T-Pose stimmen die Orientierungen der lokalen Koordinatensysteme mit dem Weltkoordinatensystem überein. Da sich der Mitarbeiter bei der Arbeit aber in Bewegung befindet und das Becken somit seine Lage ändert, berechnet Gleichung (6-4) die Position der Kugel relativ zum Becken ( $\overline{BK}_{Bew}$ ). Mit Gleichung (6-5) folgt die Position des Kugelmittelpunkts für beliebige Bewegungen. Die Berechnung erfolgt analog für die rechte und linke Hand und ein Algorithmus überprüft für jeden Datenpunkt einer Aufnahme, ob Bedingung (6-6) erfüllt ist.

$$\vec{K}_{NNS} = \begin{pmatrix} x_{Schulter} \\ y_{Schulter} - L_{Arm} \\ z_{Schulter} \end{pmatrix} \quad (6-2)$$

$$\overline{BK}_{NNS} = \begin{pmatrix} x_{\vec{K}_{NNS}} - x_{Becken} \\ y_{\vec{K}_{NNS}} - y_{Becken} \\ z_{\vec{K}_{NNS}} - z_{Becken} \end{pmatrix} \quad (6-3)$$

$$\overline{BK}_{Bew} = q_{Becken} \cdot \overline{BK}_{NNS} \cdot q_{Becken}^{-1} \quad (6-4)$$

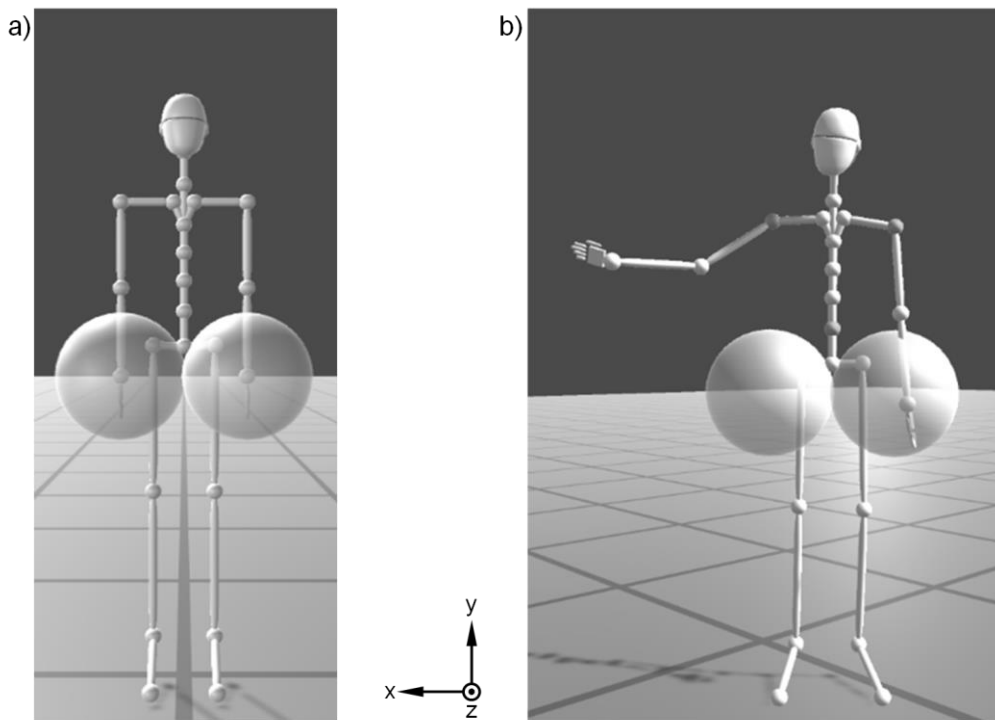
$$\vec{K}_{Bew} = \begin{pmatrix} x_{Becken} + x_{\overline{BK}_{Bew}} \\ y_{Becken} + y_{\overline{BK}_{Bew}} \\ z_{Becken} + z_{\overline{BK}_{Bew}} \end{pmatrix} \quad (6-5)$$

$$\left| \begin{pmatrix} x_{\vec{K}_{Bew}} - x_{Hand} \\ y_{\vec{K}_{Bew}} - y_{Hand} \\ z_{\vec{K}_{Bew}} - z_{Hand} \end{pmatrix} \right| < 20 \text{ cm} \quad (6-6)$$

$\vec{K}_{NNS}$	Ortsvektor der neutralen Kugel in der Neutral-Null-Stellung [m]
$x_{GP}$	x-Koordinate des Gelenkpunkts GP [m]
$y_{GP}$	y-Koordinate des Gelenkpunkts GP [m]
$z_{GP}$	z-Koordinate des Gelenkpunkts GP [m]
$L_{Arm}$	Armlänge ohne Hand [m]
$\overline{BK}_{NNS}$	Vektor vom Becken zum Kugelmittelpunkt in der Neutral-Null-Stellung [m]
$\overline{BK}_{Bew}$	Vektor vom Becken zum Kugelmittelpunkt in Bewegung [m]
$q_{Becken}$	Rotation des Beckens [-]
$\vec{K}_{Bew}$	Ortsvektor der neutralen Kugel in Bewegung [m]

Liegt die Handposition innerhalb der jeweiligen Kugel und erfüllt somit Bedingung (6-6), schließt der Software-Prototyp den Arm von der Bewegungstransformation aus. Abbil-

Abbildung 6-4b) zeigt eine Beispielhaltung, bei der sich das linke Handgelenk in einer neutralen Position befindet und somit von der Transformation ausgeschlossen ist. Für das rechte Handgelenk ist die Lage des Handgelenks jedoch vom Arbeitsplatz vorgegeben.



**Abbildung 6-4: Erkennen neutraler Handpositionen: a) Definition der neutralen Position mittels Neutral-Null-Stellung; b) Beispielhaltung, bei der die linke Hand von der Bewegungstransformation ausgeschlossen wird**

### 6.2.3 Erzeugung individueller Bewegungsabläufe

Für die verbliebenen kinematischen Daten aus der Bewegungsaufnahme berechnet der Software-Prototyp Bewegungs- bzw. Rotationsziele. Wie zuvor beschrieben, ermöglicht *Retargeting* das Übertragen einer Bewegungsaufnahme auf Avatare verschiedener Körpermaße. In den nachfolgenden Berechnungen sind demnach die kinematischen Daten der Originalaufnahme und die kinematischen Daten der generierten Bewegungsabläufe zu unterscheiden. Ein Nebeneffekt beim *Retargeting* ist, dass die Gelenkpunkte der Avatare nicht die gleichen absoluten Positionen erreichen (vgl. Abbildung 6-1). Ein Mitarbeiter kann die Arbeitsaufgabe jedoch nur erfüllen, wenn er vom Arbeitsplatz vorgegebene Bewegungsziele erreicht. Um für Mitarbeiter in Bewegung eine Position zu beschreiben, ist daher im ersten Schritt ein Nullpunkt für jeden Avatar zu definieren, relativ zu welchem die Bewegungsziele vorgegeben werden. Diese Arbeit definiert die über die x-z-Koordinaten definierte horizontale Position des Beckens als Nullpunkt, der sich wie folgt ergibt:

$$\overrightarrow{NP}_A = \begin{pmatrix} x_{Becken,A} \\ 0 \\ z_{Becken,A} \end{pmatrix} \quad (6-7)$$

$\overrightarrow{NP}_A$       *Nullpunkt des Avatars A [m]*  
 $x_{GP,A}$       *x-Koordinate des Gelenkpunkts GP von Avatar A [m]*  
 $z_{GP,A}$       *z-Koordinate des Gelenkpunkts GP von Avatar A [m]*

Die Position der Bewegungsziele für die Hände berechnet sich anschließend relativ zum Nullpunkt des Avatars der originalen Bewegungsaufnahme:

$$\overrightarrow{BZ}_{Hand} = \begin{pmatrix} x_{Hand,0} \\ y_{Hand,0} \\ z_{Hand,0} \end{pmatrix} - \overrightarrow{NP}_0 \quad (6-8)$$

$\overrightarrow{BZ}_{Hand}$       *Bewegungsziel der Hand [m]*  
 $x_{GP,0}$       *x-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]*  
 $y_{GP,0}$       *y-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]*  
 $z_{GP,0}$       *z-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]*  
 $\overrightarrow{NP}_0$       *Nullpunkt des Avatars der Originalaufnahme [m]*

Zusätzlich speichert der Software-Prototyp die Rotation der Hände aus der Originalaufnahme. Da die Rotation unabhängig von der Position eines Avatars ist, ist keine Berechnung eines Nullpunkts erforderlich:

$$\overrightarrow{RZ}_{Hand} = q_{Hand,0} \quad (6-9)$$

$\overrightarrow{RZ}_{Hand}$       *Rotationsziel der Hand [-]*  
 $q_{GP,0}$       *Orientierung des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [-]*

Neben den Handpositionen sind auch die Sichtziele vom Arbeitsplatz vorgegeben, da ein Mitarbeiter beispielsweise beim Greifen oder beim Fügen den Blick auf das handzuhabende Objekt richtet. Gleiches gilt für Informationen zur Arbeitsaufgabe, die papierbasiert oder auf Bildschirmen bereitgestellt und vom Mitarbeiter mit den Augen erfasst werden. Auch wenn sich die Sichtziele in der Realität in ihrer Distanz zum Kopf unterscheiden, ist eine genaue Erfassung nicht praktikabel. Die Methode verwendet daher eine mittlere Distanz als Näherungswert: Im Standard beträgt sie 50 cm in Blickrichtung vom Kopf des Mitarbeiters. Auch hier steht es dem Methodenanwender frei, die mittlere Distanz zum Sichtziel dem analysierten Arbeitsplatz anzupassen. Bewegungen des Auges selbst vernachlässigt der Algorithmus. Das Sichtziel berechnet sich ebenfalls relativ zum Becken. Da sich der Mitarbeiter in Bewegung befindet, ist der Vektor, der die mittlere Distanz beschreibt, zusätzlich um die Rotation des Kopf zu drehen (6-10).

$$\vec{S\bar{Z}} = \begin{pmatrix} x_{Kopf,0} \\ y_{Kopf,0} \\ z_{Kopf,0} \end{pmatrix} + q_{Kopf,0} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ SD \end{pmatrix} q_{Kopf,0}^{-1} - \vec{N\bar{P}}_O \quad (6-10)$$

$\vec{S\bar{Z}}$	<i>Sichtziel [m]</i>
$x_{GP,0}$	<i>x-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$y_{GP,0}$	<i>y-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$z_{GP,0}$	<i>z-Koordinate des Gelenkpunkts GP der Originalaufnahme [m]</i>
$q_{GP}$	<i>Rotation des Gelenkpunkts GP [-]</i>
$SD$	<i>mittlere Distanz zum Sichtziel [m]</i>
$\vec{N\bar{P}}_O$	<i>Nullpunkt des Avatars der Originalaufnahme [m]</i>

Sind die Bewegungs- und Rotationsziele bekannt, sind sie dem Avatar während der Bewegungstransformation vorzugeben. Der Software-Prototyp verändert die Bewegung mithilfe der inversen Kinematik, während die Bewegungsaufnahme auf die anderen Avatare übertragen wird. Hierzu prüft ein Algorithmus für jeden Zeitpunkt, ob Bewegungs- und Rotationsziele der Hände und/oder Sichtziele vorhanden sind. Im nächsten Schritt gibt der Software-Prototyp die Ziele relativ zur aktuellen Position des jeweiligen Avatars vor.

**Bewegungs- und Rotationsziel der Hände.** Für die Hände ergeben sich individuelle Bewegungsziele für jeden Avatar, während die Rotationsziele für jeden Avatar gleich sind:

$$\vec{IKB\bar{Z}}_{Hand,A} = \vec{N\bar{P}}_A + \vec{B\bar{Z}}_{Hand} \quad (6-11)$$

$$\vec{IKR\bar{Z}}_{Hand,A} = \vec{R\bar{Z}}_{Hand} \quad (6-12)$$

$\vec{IKB\bar{Z}}_{Hand,A}$	<i>Bewegungsziel der inversen Kinematik für die jeweilige Hand von Avatar A [m]</i>
$\vec{N\bar{P}}_A$	<i>Nullpunkt des Avatars A [m]</i>
$\vec{B\bar{Z}}_{Hand}$	<i>Bewegungsziel der Hand [m]</i>
$\vec{IKR\bar{Z}}_{Hand,A}$	<i>Rotationsziel der inversen Kinematik für die jeweilige Hand von Avatar A [-]</i>
$\vec{R\bar{Z}}_{Hand}$	<i>Rotationsziel der Hand [-]</i>

**Rotationsziel des Kopfes.** Um das Rotationsziel des Kopfes für jeden Avatar individuell zu definieren, berechnet der Software-Prototyp die lokalen Achsen, mit denen der Kopf des Avatars das Sichtziel fokussiert. Die neue z-Achse  $z'$  berechnet sich nach (6-13) und ist auf das Sichtziel gerichtet. Die neue x-Achse  $x'$  wird als orthogonaler Vektor der ursprünglichen y-Achse und der neuen z-Achse definiert (6-14) und die neue y-Achse  $y'$  steht orthogonal zu den anderen beiden Achsen (6-15). Mithilfe dieser neuen Achsen definiert der Software-Prototyp das Rotationsziel der inversen Kinematik für jeden Avatar (6-16).

$$\vec{z}'_{Kopf,A} = \vec{NP}_A + \vec{SZ} - \vec{OK} \quad (6-13)$$

$$\vec{x}'_{Kopf,Soll,A} = \vec{y}'_{Kopf,A} \times \vec{z}'_{Kopf,A} \quad (6-14)$$

$$\vec{y}'_{Kopf,Soll,A} = \vec{z}'_{Kopf,A} \times \vec{x}'_{Kopf,A} \quad (6-15)$$

$$\overrightarrow{IKRZ}_{Kopf,A} = q_{x'y'z',Kopf} \quad (6-16)$$

$\vec{x}'_{Kopf,A}$  *x-Achse des rotierten Kopfes von Avatar A [-]*

$\vec{y}'_{Kopf,A}$  *y-Achse des rotierten Kopfes von Avatar A [-]*

$\vec{z}'_{Kopf,A}$  *z-Achse des rotierten Kopfes von Avatar A [-]*

$\vec{y}'_{Kopf,A}$  *y-Achse des Kopfes von Avatar A vor der Bewegungstransformation [-]*

$\vec{NP}_A$  *Nullpunkt des Avatars A [m]*

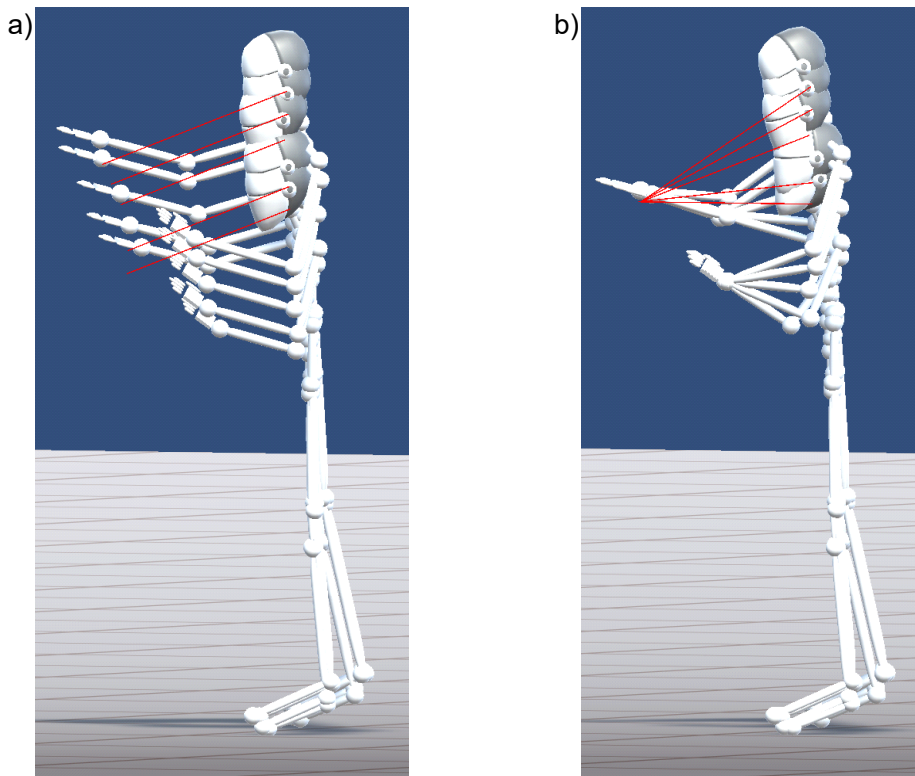
$\vec{SZ}_A$  *Sichtziel des Avatars A [m]*

$\vec{OK}$  *Ortsvektor des Kopfes [m]*

$\overrightarrow{IKRZ}_{Kopf,A}$  *Rotationsziel der inversen Kinematik für den Kopf von Avatar A [-]*

$q_{x'y'z',Kopf}$  *Rotation des Kopfes von Avatar A, der auf das Sichtziel ausgerichtet ist [-]*

Abbildung 6-5 zeigt für eine beispielhafte Körperhaltung, wie der Einsatz der inversen Kinematik das Ergebnis der mittels *Retargeting* transformierten Bewegung verändert. Der Mitarbeiter führt mit der rechten Hand eine Greifbewegung aus und stützt sich mit der linken Hand ab. Der Blick fällt auf das zu greifende Objekt und die Sichtlinien der jeweiligen Avatare sind rot dargestellt. Während die Avatare in Abbildung 6-5a) sehr unterschiedliche Handpositionen und Blickziele aufweisen, sind die Gelenke in Abbildung 6-5b) vom IK-Solver so eingestellt, dass sie die notwendigen Bewegungs- und Blickziele erreichen. Die kleinen Unterschiede in den Handpositionen lassen sich zum einen durch leicht unterschiedliche Hüftpositionen erklären, die beim *Retargeting* des ursprünglichen Bewegungsablaufs entstehen. Zum anderen erreicht die Gelenkkonfiguration nur eine begrenzte Genauigkeit (s. Abschnitt 6.4).



**Abbildung 6-5: Transformierte Körperhaltung beim rechtshändigen Greifen von Material für fünf Mitarbeiter mit roter Sichtlinie: a) Körperhaltung nach Retargeting ohne Einsatz inverser Kinematik; b) Körperhaltung nach Retargeting mit Einsatz inverser Kinematik**

Der Software-Prototyp speichert die individualisierten Bewegungsabläufe in demselben Datenformat wie die ursprünglichen Bewegungsdaten. Somit ist es möglich, dieselben Algorithmen für die Arbeitsplatzbewertung zu verwenden wie bei der Analyse der Originalaufnahme.

Die gefundene Lösung für die Körperhaltung ist nur eine Möglichkeit, die vom Arbeitsplatz erforderlichen Positionen zu erreichen. In der Realität wird der Mitarbeiter von dieser Bewegung abweichen, denn selbst bei wiederholter Ausführung der Arbeitsaufgabe resultieren aufgrund der komplexen kinematischen Kette des menschlichen Körpers verschiedene Bewegungsabläufe für denselben Mitarbeiter. Die Bewegungstransformation gibt also nur eine gute Einschätzung darüber, wie ein Arbeiter die Arbeitsschritte ausführen kann, garantiert aber nicht, dass ein Arbeiter dieselben Körperhaltungen einnehmen wird.

Die Bewegungstransformation verzichtet bewusst auf eine Berücksichtigung der ermittelten Bewegungsumfänge bei der Bewegungstransformation, um mögliche Schwächen im Arbeitsplatzdesign bei der Risikobewertung einfach aufdecken zu können. Aus diesem

Grund kann es zu Gelenkwinkeln kommen, die über dem individuellen Bewegungsumfang liegen.

### 6.3 Analyse und Maßnahmenableitung

Für jeden der erzeugten Bewegungsabläufe ist es möglich, analog zu Abschnitt 5.5 eine individuelle Bewertung für jeden Mitarbeiter mit lediglich einer Arbeitsplatzaufnahme zu erstellen. Insbesondere für *Perspektive 4 - Analyse mehrerer Mitarbeiter an mehreren Arbeitsplätzen* senkt die Bewegungstransformation den Aufnahmeaufwand signifikant im Vergleich zur Aufnahme von jedem Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz.

Ein großer Vorteil der Erstellung individualisierter Bewegungsabläufe auf Basis von einer Aufnahme liegt darin, dass die Zeitstempel jeder Bewegung für jeden Mitarbeiter gleich sind. Greift der Mitarbeiter in der Originalaufnahme zu einem spezifischen Zeitpunkt nach Material, führen auch die Avatare aus der Bewegungstransformation denselben Arbeitsschritt zum selben Zeitpunkt aus. Dementsprechend wirken die Lastgewichte zu denselben Zeitpunkten und auch die Dauer der Arbeitsschritte ist für alle Mitarbeiter gleich. Somit ist es möglich, die Analyseergebnisse zu jedem Zeitpunkt, aber auch in ihrer Gesamtauswertung miteinander zu vergleichen.

Eine konventionelle Aufnahme aller Mitarbeiter an einem Arbeitsplatz erfordert hingegen einen hohen Nachbearbeitungsaufwand, weil jeder Arbeitsschritt aus jeder Aufnahme zu identifizieren ist, um sie miteinander zu vergleichen. Sind die Prozesse nicht in jeder Bewegung standardisiert, wie zum Beispiel bei der kundenindividuellen Produktion, ist die direkte Vergleichbarkeit zwischen den Aufnahmen ohnehin nicht gegeben, da sich die handzuhabenden Objekte und auch die Zeitanteile der verschiedenen Arbeitsschritte zum Teil maßgeblich unterscheiden.

Bevor dieses Kapitel die zusätzlichen Möglichkeiten zur Maßnahmenableitung diskutiert, zeigt Abbildung 6-6 die Risikobewertung für fünf Mitarbeiter, die mithilfe der Bewegungstransformation erstellt wurden.

Die transformierten Bewegungsabläufe basieren auf der Aufnahme, die Abschnitt 5.5 bereits aufgegriffen hat. Ein Mitarbeiter hebt wiederholt ein Werkstücke von einer Palette und verpackt diese neu (vgl. Abbildung 5-4). Mitarbeiter 1 in Abbildung 6-6 entspricht dem real aufgenommenen Mitarbeiter. Die Ergebnisse von Mitarbeiter 2 bis 5 wurden aus den transformierten Bewegungsabläufen abgeleitet. Die Unterschiede zwischen den Mitarbeitern lassen sich wie folgt erklären:

## 6 Erzeugung individueller Bewegungsabläufe

- Lastenhandhabung: Das Heben von der Palette wurde als ergonomisch kritisch für das L5S1-Moment bewertet. Die niedrigere Risikokategorie von Mitarbeiter 3 lässt sich mit einem geringeren Körpergewicht in Kombination mit einer geringeren Körpergröße erklären, was zu einem geringeren L5S1-Moment führt.
- Gelenkbeweglichkeit: Die Unterschiede zwischen den Mitarbeitern lassen sich auf die individuelle Gelenkbeweglichkeit und die Körpergröße der Arbeitnehmer zurückführen. So war beispielsweise der Bewegungsumfang der Wirbelsäule bei Mitarbeiter 2 besonders hoch, was zu einem geringeren Zeitanteil oberhalb der Risikoklasse 2 führte.
- Statische Haltung: Eine statische Haltung der Knie sowie der BWS/LWS dauerte bei der Dokumentation der absolvierten Arbeitsschritte am Ende der Bewegungsaufnahme mehr als 30 Sekunden. Da die Gelenkwinkel jedoch nahe ihrer neutralen Position lagen, stellen die Haltungen kein ergonomisches Risiko dar.

Mitarbeiter	1	2	3	4	5
Lastenhandhabung					
Gelenkbeweglichkeit					
Statische Haltung					

**Abbildung 6-6: Arbeitsplatzbewertung aus einer Industrieaufnahme. Die Ergebnisse sind für ein einfacheres Verständnis der Methode leicht angepasst und legen den Fokus auf die Wirbelsäule. Erhöhte Risikobewertungen z. B. der Schultern einzelner Mitarbeiter werden zur Reduktion der Komplexität grün dargestellt.**

Die Bewegungstransformation ermöglicht es, die Belastung am Arbeitsplatz für beliebig viele Mitarbeiter aufwandsarm zu ermitteln und individuell zu bewerten. Aus der Bewertung lässt sich ableiten, wie viele Mitarbeiter in der Lage sind, einen Arbeitsschritt entsprechend seinen individuellen Fähigkeiten auszuführen oder nicht. Die Methode nutzt diese Informationen, um zu entscheiden, ob eine allgemeine Maßnahme (z. B. Umgestaltung des Arbeitsplatzes) oder eine individuelle Maßnahme (z. B. Bereitstellung einer Trittleiter für kleine Arbeiter) erforderlich ist. Wie zuvor beschrieben, ist ein solches Vorgehen auch mit einer Aufnahme aller Mitarbeiter am Arbeitsplatz möglich, jedoch in der Praxis wegen des hohen Aufwands wenig praktikabel.

Tabelle 6-1 greift erneut das Beispiel aus Abschnitt 5.5 auf und zeigt die Bewertung der Körperhaltung, während der Mitarbeiter mit vorgebeugtem Oberkörper ein Objekt einhändig von der Palette hebt. Sie stellt die Ergebnisse der Risikobewertung für mehrere Mitarbeiter zu einem diskreten Zeitpunkt dar und folgt der gleichen Logik wie Tabelle 5-8. Die beiden Darstellungen unterscheiden sich jedoch in der Aggregationsebene der Daten.

**Tabelle 6-1: Allgemeiner, individueller oder kein Maßnahmenbedarf zu einem Zeitpunkt**

	HWS	Schulter				Ellenbogen		Handgelenk		BWS/LWS			Knie	
	GBW	GBW		GM		GBW		GBW		GBW	GM	WKK	GBW	
		L	R	L	R	L	R	L	R				L	R
MA 1														
MA 2														
MA 3														
MA 4														
MA 5														
	↓	↓				↓		↓		↓			↓	
Σ	0	5	0	0	0	5	5	0	5	0	0	1	5	5
Σ	5	0	3	5	0	0	0	5	0	4	0	0	0	0
Σ	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Σ	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	4	4	0	0
A, I, K	K	K	K	K	A	K	K	K	K	I	A	A	K	K

MA: Mitarbeiter; HWS: Halswirbelsäule; BWS/LWS: Brust- und Lendenwirbelsäule  
 GBW: Gelenkbeweglichkeit; GM: Gelenkmoment; WKK: Wirbelsäulenkompressionskraft  
 A: Allgemeiner Maßnahmenbedarf; I: Individueller Maßnahmenbedarf; K: Kein Maßnahmenbedarf

Tabelle 5-8 zeigt anhand der Gesamtbewertung eines Arbeitsplatzes, ob ein allgemeiner, individueller oder kein Maßnahmenbedarf besteht. Hierbei lässt sich zunächst keine Aussage treffen, welche oder wie viele Arbeitsschritte zu einer Überbeanspruchung führen. In Bezug auf die Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit betrachtet sie den gesamten Arbeitsablauf und visualisiert die kumulierte Beanspruchung (vgl. Abschnitt 5.4.2).

Anhand von Tabelle 6-1 kann der Methodenanwender hingegen den Maßnahmenbedarf für einen beliebigen Zeitpunkt ermitteln und unter Zuhilfenahme der Körperhaltung eine Verbesserungsmaßnahme planen.

Da die Körperhaltung mittels Bewegungstransformation auf die Avatare der anderen Mitarbeiter übertragen wird, führen diese den Arbeitsschritt ebenfalls in der Vorbeuge durch. Aufgrund der Körperhaltung und dem wirkenden Lastgewicht ist das ergonomische Risiko für den Großteil der Mitarbeiter an der BWS/LWS bzgl. der wirkenden Kräfte hoch und bzgl. der Gelenkbeweglichkeit wesentlich erhöht. Außerdem ist das Gelenkmoment der rechten Schulter mit einem hohen ergonomischen Risiko verbunden. Für diese Risikokategorien ist somit ein allgemeiner Maßnahmenbedarf abzuleiten. Zudem übersteigt die Gelenkbeweglichkeit (hier: Flexion) der BWS/LWS den Bewegungsumfang von Mitarbeiter 4. Da die Methode für die restlichen Mitarbeiter einen größeren Bewegungsumfang festgestellt hat, liegt nur für Mitarbeiter 4 eine Überbeanspruchung vor. Daher besteht in dieser Risikokategorie ein individueller Maßnahmenbedarf, der bei der Maßnahmenableitung zu berücksichtigen ist.

### **6.4 Evaluation**

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten beschrieben, wird der tatsächliche Bewegungsablauf vom gemessenen Bewegungsablauf abweichen. Ziel der Evaluation der Bewegungstransformation ist es, zu überprüfen, wie nah die transformierten Bewegungsabläufe einer echten Bewegungsaufnahme kommen, welche Faktoren die Genauigkeit beeinflussen, und welche Auswirkungen die Abweichungen auf die ergonomische Bewertung haben.

Der nachfolgende Abschnitt stellt die Ergebnisse einer im Zuge der Dissertation betreuten Bachelorarbeit vor, in der eine Versuchsreihe mit 19 Probanden im Alter von 20 bis 29 Jahren durchgeführt und ausgewertet wurde [STUC21]. Die Probanden haben in einer industriellen Laborumgebung verschiedene Bewegungen durchgeführt, die typische Montage- und Logistikaktivitäten umfassen. Ein wichtiger Faktor bei der Versuchsdurchführung war eine hohe Variation der Körpergrößen, weil bei hohen Größenunterschieden von einer größeren Abweichung in der Bewegungsausführung auszugehen ist. Die Körpergröße der Probanden lag in einem Bereich von 152 cm bis 197 cm und war annähernd normalverteilt (vgl. Anhang B; Abbildung B-1, Ø männlicher Probanden: 182 cm; Ø weiblicher Probanden: 167 cm) [STUC21, S. 49-50]. Im Vergleich zur Gesamtpopulation Deutschlands stellen die Probanden somit einen guten Querschnitt der Bevölkerung dar (vgl. Abbildung 2-4).

Die ausgewählten Bewegungen sind an echte Arbeitsabläufe aus der Montage, Logistik und Maschinenbedienung angelehnt. In Summe umfasst der Versuch sieben kurze Bewegungsabläufe, die alle Probanden durchführen (vgl. Tabelle 6-2). Sie unterscheiden sich in ihrer Komplexität und beanspruchen unterschiedliche ergonomische Zielregionen. Die Bewegungen reichen von einfachen Greifbewegungen, die vor allem die Zielregionen des Hand-Arm-Systems und der Wirbelsäule beanspruchen, bis hin zu komplexen Zwangshaltungen, die den gesamten Körper beanspruchen. Bilder des Versuchsaufbaus sind in Anhang B, Abbildung B-2 bis Abbildung B-8 zu finden.

**Tabelle 6-2: Bewegungen zur Evaluation der Bewegungstransformation in Anlehnung an [STUC21, S. 34-42]**

Nr.	Bewegung	Beschreibung	Beanspruchung von
1	Greifen	Berühren von verschiedenen Markern in einer Montagelinie	Hand-Arm-System (R+L) HWS BWS/LWS
2	Werkzeug- bedienung	Festziehen und Lösen von Getriebschrauben mittels Akkuschrauber	Hand-Arm-System (R) HWS
3	Heben und Einlagern	Heben eines Getriebes von einer Palette und Einlagern in einen Transportwagen	Hand-Arm-System (R+L) HWS BWS/LWS Knie
4	Seitliches Heben und Fügen	Seitliches Heben einer Stange von einer Palette und beidhändiges Fügen auf einer Höhe von ca. zwei Metern	Hand-Arm-System HWS BWS/LWS
5	Maschinen- bedienung (manuell)	Betätigen des Vorschubhebels einer Ständerbohrmaschine	Hand-Arm-System (R)
6	Maschinen- bedienung (automatisch)	Erreichen einer Handposition mit Blickziel auf Hüfthöhe	Hand-Arm-System (R) HWS BWS/LWS
7	Körperzwangs- haltung	Ansetzen eines Maulschlüssels auf der körperabgewandten Seite eines Schiffskompressors	Hand-Arm-System HWS BWS/LWS Knie

Um eine ähnliche Bewegungsausführung zu erreichen, wurden den Probanden die Bewegungen vorgeführt und Positionsmarker haben die Fußpositionen vorgegeben. Damit der Versuchsaufbau einen eingeschwungenen Produktionsablauf simuliert, wurden Lerneffekte bei der Wiederholung des Bewegungsablaufs mithilfe des DeJong-Modells berücksichtigt und eine Mindestwiederholungszahl von sieben Wiederholungen bestimmt (Lernrate: 0,8; Unreduzierbarkeitsfaktor: 0,5). Nach der siebten Wiederholung liegt der Lernfortschritt unter einem Prozentpunkt und die Bewegung wird als ausreichend standardisiert angenommen. Die Streuung der Gelenkwinkel der nachfolgenden Wiederholungen bietet demnach einen guten Vergleichswert, um die Abweichung zwischen echtem und transformiertem Bewegungsablauf zu bewerten [STUC21, S. 30-33].

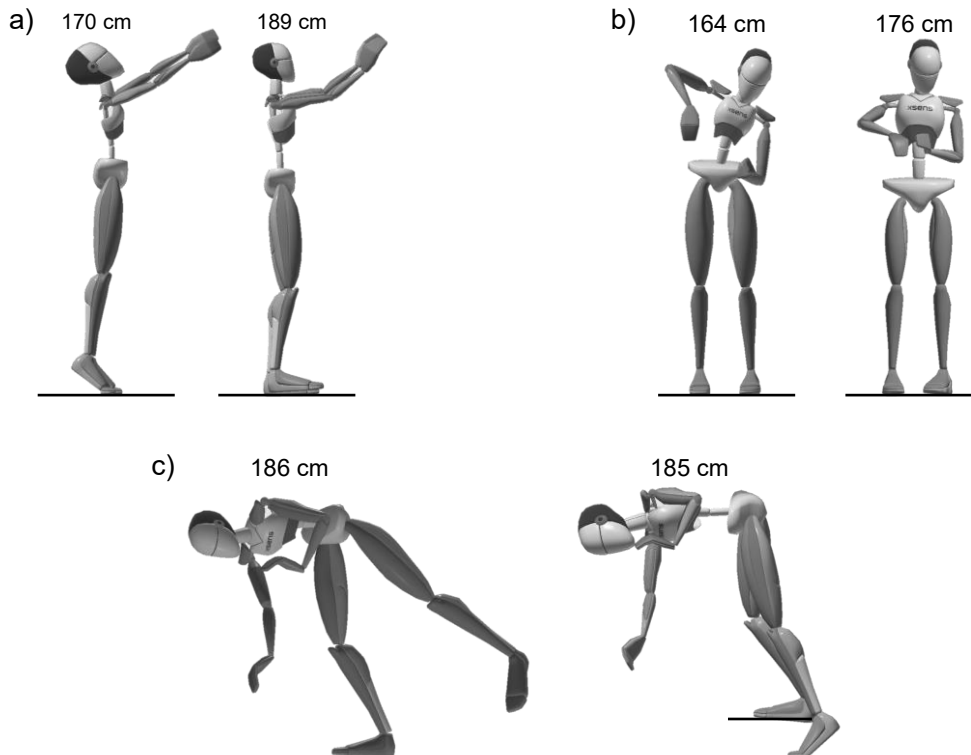
Die Auswertung betrachtet die Bewegungen, die vom Arbeitsplatz vorgegeben sind. Hierzu zählen das *Hinlangen*, *Fügen* und *Loslassen* des Grundzyklus und die *weiteren Bewegungen* des Hand-Arm-Systems (vgl. Abbildung 3-1). Zur Auswertung wurden alle Bewegungsabläufe auf alle Körpergrößen der Probanden transformiert und für jede Bewegungsausführung wurde der Zeitpunkt bestimmt, zu dem ein Proband mit dem Arbeitsplatz interagiert, wie zum Beispiel beim Greifen oder Fügen. Für die zugehörige Körperhaltung hat der Software-Prototyp anschließend die Gelenkwinkel berechnet und diese wurden mit den Gelenkwinkeln des realen Bewegungsablaufs verglichen. Beispielhafte Messwerte einer realen Aufnahme von Testperson 2 und beispielhafte Gelenkwinkel der transformierten Bewegungsabläufe für Testperson 2 sind in Anhang B, Tabelle B-1 und Tabelle B-2 zu finden. Die Auswertungen für die weiteren Testpersonen und Gelenkwinkel wurden analog erstellt.

Allgemein haben die Versuche gezeigt, dass die Streuung der Gelenkwinkel mit der Komplexität der Übungen und der Größendifferenz zwischen den Mitarbeitern zunimmt. Bei einfachen Greifbewegungen, die keine Bewegung der Wirbelsäule erfordern, liegen die Differenzen zwischen transformierten Bewegungsabläufen im Vergleich zum Original bis auf einzelne Ausreißer unter 20 Grad bei einer natürlichen Abweichung von bis zu zehn Grad. Die Ausreißer sind hier auf stark unterschiedliche Körpergrößen zurückzuführen. Komplexe Bewegungen mit einer starken Beanspruchung der Wirbelsäule und gleichzeitiger Bewegung eines Hand-Arm-Systems führen jedoch zu hohen Abweichungen zwischen realem und transformiertem Bewegungsablauf.

Um die Abweichungen zwischen den realen und transformierten Bewegungsabläufen zu erklären, zeigt Abbildung 6-7 beispielhaft die Varianz zwischen verschiedenen Probanden bei der Bewegungsausführung, die eine maßgebliche Ursache für die Unterschiede ist:

- a) Die Probanden führen eine Metallstange in dieselbe Öffnung ein (Abbildung 6-7a; Tabelle 6-2, Bewegung 4). Aufgrund der geringeren Körpergröße stellen sich kleinere Probanden auf Zehenspitzen, um die Zielposition zu erreichen, während größere Probanden diese im normalen Stand erreichen. Da sich die erhöhte Schulterposition auf alle transformierten Bewegungsabläufe überträgt, erreichen die transformierten Bewegungsabläufe geringere Gelenkwinkel für die Schultern als die Originalaufnahmen.
- b) Die Probanden ziehen die Gehäuseschraube eines Getriebes an (Abbildung 6-7b; Tabelle 6-2, Bewegung 2). Obwohl beide Probanden mit der rechten Hand einen Akkuschauber führen, unterscheiden sich die Rotationen der Handgelenke und die Sichtziele. Entsprechend führt dies zu unterschiedlichen Gelenkwinkeln zwischen den transformierten und realen Bewegungsabläufen.

- c) Die Probanden befinden sich in einer Körperzwangshaltung, um die verdeckte Schraube eines Schiffskompressors zu erreichen (Abbildung 6-7c; Tabelle 6-2, Bewegung 7). Obwohl die abgebildeten Probanden eine ähnliche Körpergröße haben, wählen sie eine stark unterschiedliche Körperhaltung. Das Beispiel zeigt, dass insbesondere bei komplexen Bewegungen nicht von einer Standardarbeitsweise auszugehen ist.



**Abbildung 6-7: Unterschiedliche Bewegungsausführung verschiedener Probanden unter Angabe ihrer Körpergröße in Anlehnung an [STUC21, S. 50]: a) Bewegung 4 (beidhändiges Fügen); b) Bewegung 2; c) Bewegung 7**

Als Fazit ist festzuhalten, dass die Bewegungstransformation für einfache Bewegungen und ähnliche Körpergrößen gute Ergebnisse erzielt. Gleichzeitig haben die Versuche jedoch gezeigt, dass zwischen den Probanden und auch zwischen den wiederholten Bewegungen eines Probanden zum Teil große Unterschiede bestehen. Entsprechend ist die unterschiedliche Bewegungsausführung ein Störfaktor, der Unterschiede zwischen den realen Bewegungsabläufen und den transformierten Bewegungsabläufen verursacht. Zudem führt die Lösung bei komplexen Körperhaltungen zu stark unterschiedlichen Gelenkwinkeln. Die Versuche haben aber auch hier gezeigt, dass sich die Gelenkwinkel bereits bei mehrfacher Ausführung derselben Bewegung unterscheiden.

Ordnet man die Ergebnisse im Kontext der ergonomischen Arbeitsplatzbewertung ein, zeigt sich, dass eine Anwendung der Bewegungstransformation insbesondere bei einfachen Bewegungsabläufen zu empfehlen ist. Für komplexe Bewegungsabläufe können Unternehmen überlegen, die Bewegungsabläufe nicht nur von einem, sondern von mehreren Mitarbeitern durchführen zu lassen.

Qualitativ erzeugt die Bewegungstransformation jedoch realistische Bewegungsabläufe, die eine einfache ergonomische Bewertung einer hohen Anzahl an Mitarbeitern ermöglicht. Ist sich der Methodenanwender dieser Einschränkungen bewusst, ist es demnach ein gutes Mittel, wenn eine Analyse von jedem Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz unmöglich ist. Außerdem ist zu empfehlen, dass Unternehmen einen Mitarbeiter für die Arbeitsplatzaufnahme auswählen, dessen Körpergröße dem Durchschnitt der Belegschaft entspricht. Bei stark unterschiedlichen Körpergrößen der Nutzerpopulation bietet es sich an, die Belegschaft in Nutzergruppen zu unterteilen und einen Mitarbeiter jeder Nutzergruppe für die anschließende Bewegungstransformation aufzunehmen.

## 7 Anwendung in der Industrie

Zur Evaluation des Gesamtsystems wurden alle Schritte der Methode in mehreren Industrieunternehmen durchgeführt. Dieser Abschnitt stellt die Analyseergebnisse von beispielhaften Montage- (Abschnitt 7.1) und Logistikarbeitsplätzen (Abschnitt 7.2) vor. Insgesamt haben 13 Mitarbeiter (Montage: 8; Logistik: 5) die Fähigkeitsanalyse durchgeführt und es wurde die Belastung an sechs Arbeitsplätzen (Montage: 4; Logistik: 2) analysiert. Hierzu hat je ein Mitarbeiter den Arbeitsauftrag bearbeitet und der Bewegungsablauf wurde anschließend auf die restlichen Mitarbeiter übertragen. So war es möglich, die Belastung für jeden Mitarbeiter mithilfe der Fähigkeitsprofile individuell zu bewerten. Aufbauend auf den Analyseergebnissen haben die Unternehmen anschließend Verbesserungsmaßnahmen beschlossen.

### 7.1 Montage

Dieser Abschnitt stellt ausgewählte Anwendungsbeispiele aus der Montage vor. Insgesamt wurden vier unterschiedliche Arbeitsplätze analysiert. Abschnitt 7.1.1 stellt die Fähigkeitsprofile der Mitarbeiter vor und Abschnitt 7.1.2 geht anschließend auf die Ergebnisse der Analyse eines Arbeitsplatzes ein. An dem vorgestellten Arbeitsplatz wurden zwei unterschiedliche Mitarbeiter aufgenommen, um zu untersuchen, inwiefern die Aufnahme unterschiedlicher Mitarbeiter die Ergebnisse der Arbeitsplatzanalyse beeinflusst. Abschließend zeigt Abschnitt 7.1.3, wie das Unternehmen die Analyseergebnisse zur Maßnahmenableitung nutzen konnte.

#### 7.1.1 Fähigkeitsanalyse

Die Fähigkeitsanalyse wurde mit acht Mitarbeitern des Unternehmens durchgeführt. Alle Mitarbeiter sind in der Montage tätig, aber unterschiedlichen Montagearbeitsplätzen zugewiesen. Da die Montageprozesse sehr ähnlich sind, ist nach einer Einweisung der Einsatz aller Mitarbeiter an allen untersuchten Arbeitsplätzen möglich.

Abbildung 7-1 zeigt die Ergebnisse der Fähigkeitsanalysen der untersuchten Mitarbeiter. Damit keine Rückschlüsse auf den individuellen Mitarbeiter möglich sind, ist immer nur die Anzahl der Mitarbeiter mit einer Einschränkung dargestellt. Die grünen Säulen geben die Anzahl der Mitarbeiter an, deren Bewegungsumfang bzw. Handgriffkraft innerhalb des Normbereichs einer gesunden Person liegen. Die gelben Säulen zeigen hingegen auf, bei wie vielen Mitarbeitern eine Einschränkung an der entsprechenden Zielregion vorliegt. Stellt die Fähigkeitsanalyse einen verminderten Bewegungsumfang bei mindestens einer Bewegungsübung einer Zielregion fest, ist die gesamte Zielregion für den Mitarbeiter gelb eingefärbt. Um die Ergebnisse der anschließenden Arbeitsplatzanalyse interpretieren

tieren zu können, sind nur Einschränkungen der Gelenkwinkel abgebildet, die der Software-Prototyp direkt mit dem Bewegungsablauf am Arbeitsplatz vergleicht. Daher sind mögliche Einschränkungen bei den Rotationswinkel der Schultern nicht dargestellt.

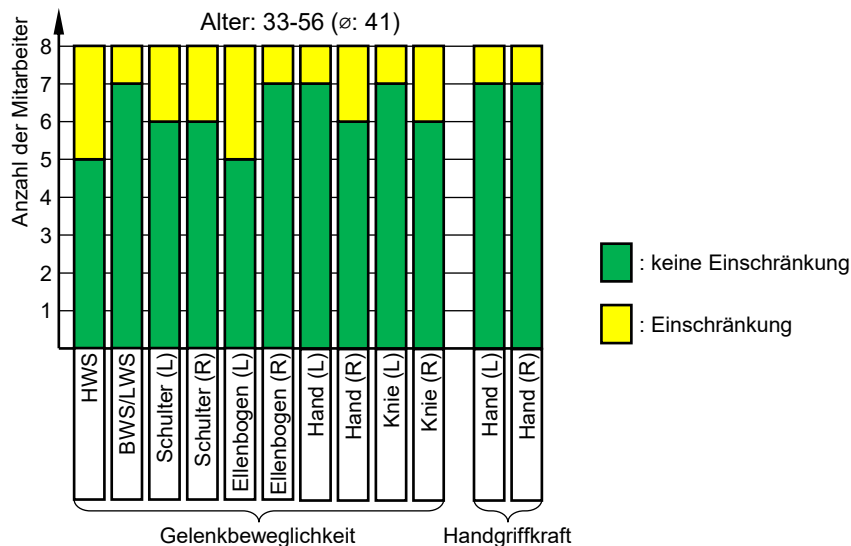


Abbildung 7-1: Fähigkeitsprofile der Montagemitarbeiter

Die Fähigkeitsanalysen haben für jede erfasste Zielregion bei mindestens einem Mitarbeiter eine Einschränkung in der Beweglichkeit festgestellt. Die auffälligsten Körperbereiche waren die Halswirbelsäule und der linke Ellenbogen, für die bei drei von acht Mitarbeitern (37,5 %) eine Einschränkung festgestellt wurde.

Zudem hat die Fähigkeitsanalyse bei je einem Mitarbeiter (12,5 %) eine niedrige Handgriffkraft der linken bzw. rechten Hand festgestellt. Dementsprechend wurden bei der anschließenden Risikobewertung die Grenzwerte der Lastenhandhabung mithilfe des Reduktionsfaktors herabgesetzt (vgl. Abschnitt 4.3.2).

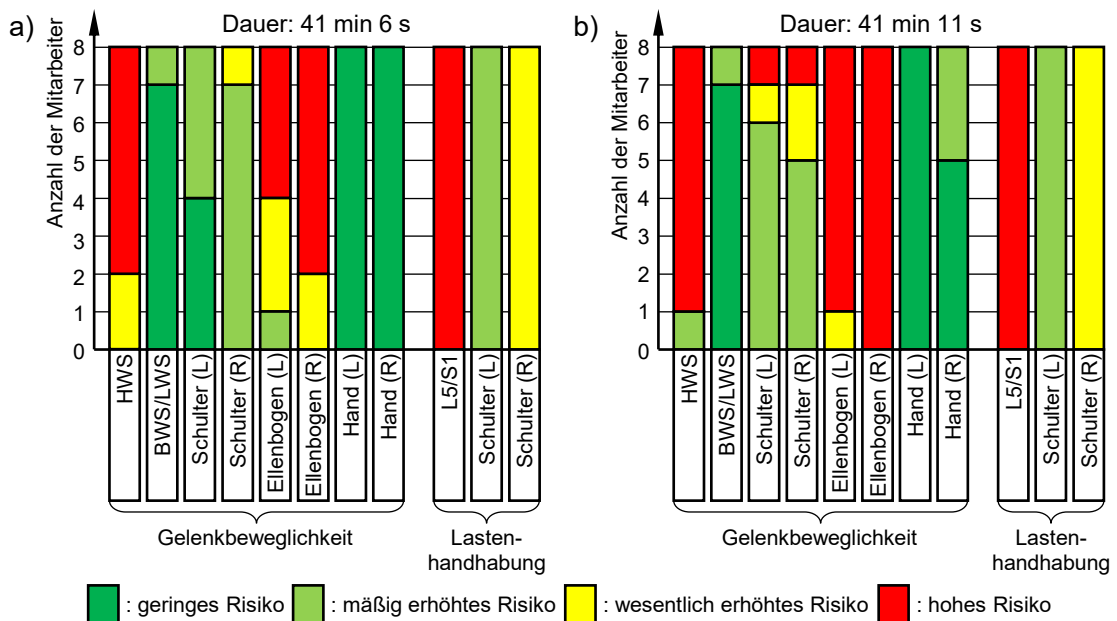
Allgemein zeigen die Ergebnisse, dass die Fähigkeitsanalyse in der Lage ist, Defizite in der Gelenkbeweglichkeit und der Handgriffkraft aufwandsarm festzustellen. Die erstellten Fähigkeitsprofile konnten zudem in der nachfolgenden Arbeitsplatzanalyse genutzt werden, um eine Risikobewertung entsprechend der individuellen Fähigkeiten zu erstellen.

### 7.1.2 Arbeitsplatzanalyse

Die Arbeitsplatzanalyse wurde mit zwei verschiedenen Mitarbeitern an einem Arbeitsplatz durchgeführt. Da es sich in dem Anwendungsbeispiel um eine kundenindividuelle

Produktion mit hoher Variantenzahl handelt, gab es leichte Unterschiede in den verwendeten Bauteilen, jedoch hatten diese ein ähnliches Gewicht und die notwendigen Arbeitsschritte haben sich nur in der Lage der Werkzeuge und -stücke unterschieden. Daher sind die Belastungen am Arbeitsplatz vergleichbar. In dem Prozess haben die Mitarbeiter Gewichte von bis zu 20 kg bewegt und waren angewiesen, bei schweren Bauteilen einen Deckenkran zu verwenden.

Um die Auswertung zu erstellen, hat der Software-Prototyp den aufgenommenen Bewegungsablauf wie in Abschnitt 6 beschrieben auf die anderen Körpergrößen transformiert. Die Körpergrößen der acht Mitarbeiter lagen zwischen 175 cm und 187 cm ( $\varnothing$ : 181,6 cm) und die Bewegungsabläufe wurden qualitativ auf ihre Gültigkeit überprüft. Abbildung 7-2 zeigt die Ergebnisse der individuellen Arbeitsplatzbewertung für die acht Mitarbeiter für die jeweilige Aufnahme. Die gestapelten Säulen geben die Anzahl der Mitarbeiter an, für die das ergonomische Risiko gemäß der Gesamtbewertung eingefärbt ist (vgl. Abschnitt 5.5). Um die Komplexität zu reduzieren, sind nur die Ergebnisse für den Oberkörper dargestellt. Problematische statische Haltungen traten nicht auf und sind daher nicht abgebildet.



**Abbildung 7-2: Arbeitsplatzbewertung eines beispielhaften Montagearbeitsplatzes: a) Aufnahme von Mitarbeiter 1; b) Aufnahme von Mitarbeiter 2**

Für die Aufnahme von Mitarbeiter 1 (Abbildung 7-2a) ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

- Bei den Zielregionen HWS, Ellenbogen (L) und Ellenbogen (R) ist die Überbeanspruchung der Gelenkbeweglichkeit bei einer Vielzahl von Mitarbeitern kritisch. Dementsprechend sind allgemeine Maßnahmen zur Reduktion der Gelenkwinkel zu prüfen.
- Die Beanspruchung infolge von Lastenhandhabung führt bei allen Mitarbeitern zu einer Überbeanspruchung an L5/S1 und/oder einer wesentlich erhöhten Beanspruchung der rechten Schulter. Für die verursachenden Arbeitsschritte sind Maßnahmen zur Reduktion der Gelenkmomente und Wirbelsäulenkompressionskraft zu prüfen.
- Für die Zielregionen BWS, Schulter (L) und Schulter (R) ist das Risiko einer Überbeanspruchung der Beweglichkeit weitestgehend gering.
- Die am wenigsten beanspruchten Zielregionen sind die Hände, die nur einem geringen ergonomischen Risiko ausgesetzt sind.

Für die Aufnahme von Mitarbeiter 2 (Abbildung 7-2b) ergeben sich ähnliche Ergebnisse:

- Bei den Zielregionen HWS, Ellenbogen (L) und Ellenbogen (R) ist die Überbeanspruchung der Gelenkbeweglichkeit bei einer Vielzahl von Mitarbeitern kritisch. Dementsprechend sind ergonomische Maßnahmen zur Reduktion der Gelenkwinkel zu prüfen.
- Die Beanspruchung infolge von Lastenhandhabung führt bei allen Mitarbeitern zu einer Überbeanspruchung an L5/S1 und/oder einer wesentlich erhöhten Beanspruchung der rechten Schulter. Für die verursachenden Arbeitsschritte sind Maßnahmen zur Reduktion der Gelenkmomente und Wirbelsäulenkompressionskraft zu prüfen.
- Für die Zielregion BWS ist das Risiko einer Überbeanspruchung der Beweglichkeit weitestgehend gering.
- Bezüglich der Gelenkbeweglichkeit der Schultern besteht für den Großteil der Mitarbeiter eine mäßig erhöhte Beanspruchung. Für einzelne Mitarbeiter ist jedoch eine Überbeanspruchung möglich und für je einen Mitarbeiter wahrscheinlich. In diesem Fall sind individuelle Maßnahmen für die entsprechenden Mitarbeiter zu prüfen.
- Die am wenigsten beanspruchten Zielregionen sind ebenfalls die Hände.

Allgemein unterstützen die Ergebnisse die Annahme, dass mithilfe der vorgestellten Methode individuelle Risikobewertungen anhand einer Bewegungsaufnahme möglich sind. Beide Aufnahmen zeigen auf, dass an dem Arbeitsplatz ein hohes ergonomisches Risiko

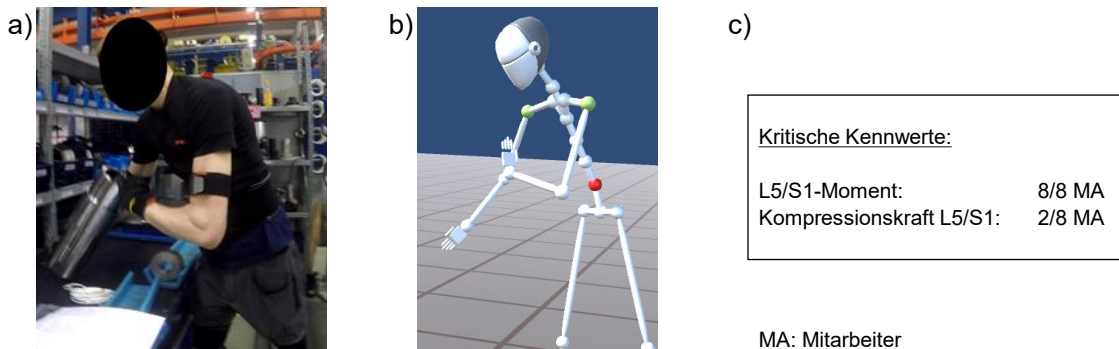
für mehrere Mitarbeiter besteht und identifizieren dieselben Zielregionen als problematisch. Die Unterschiede zwischen den beiden Aufnahmen waren vor allem auf leichte Unterschiede in Größe und Lage der Werkstücke und Werkzeuge zurückzuführen. Dies unterstützt die Annahme, dass ein Bewegungsablauf ausreicht, um das ergonomische Risiko für eine Vielzahl von Mitarbeitern auf Basis von transformierten Bewegungsabläufen individuell abzuschätzen.

Die Risikobewertung in Bezug auf die Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit zeigt auf, wie stark die individuelle Beanspruchung von den individuellen Körpermaßen der Mitarbeiter und ihren Fähigkeiten abhängt. Hier zeigt sich der große Vorteil der Methode im Vergleich zu den bestehenden Screening-Verfahren: Ermittelt ein Unternehmen die Arbeitsbelastung anhand eines Mitarbeiters und bewertet sie anhand von allgemeinen Grenzwerten, ist es möglich, dass das Risiko für einen Großteil der Mitarbeiter zu gering eingestuft wird. Einen Extremfall zeigt beispielsweise die Aufnahme von Mitarbeiter 2, bei der für einen Mitarbeiter nur ein mäßig erhöhtes Risiko an der HWS besteht, obwohl für alle anderen Mitarbeiter eine Überbeanspruchung wahrscheinlich ist. Bei der Aufnahme von nur diesem Mitarbeiter würde eine derartige Risikobewertung keinen Maßnahmenbedarf nach sich ziehen und dem Unternehmen somit eine falsche Sicherheit vortäuschen.

Zusammengefasst zeigen die Analyseergebnisse klar, worauf die allgemeinen Schwerpunkte für eine ergonomische Intervention zu legen sind. Die Ergebnisse waren in der kleinen Stichprobe reproduzierbar und unterstreichen die Notwendigkeit einer individuellen Ergonomieanalyse. Anhand der transformierten Bewegungsabläufe war es möglich, Probleme für einzelne Mitarbeiter aufgrund ihrer Körpermaße und/oder Einschränkungen zu identifizieren.

### **7.1.3 Maßnahmenableitung**

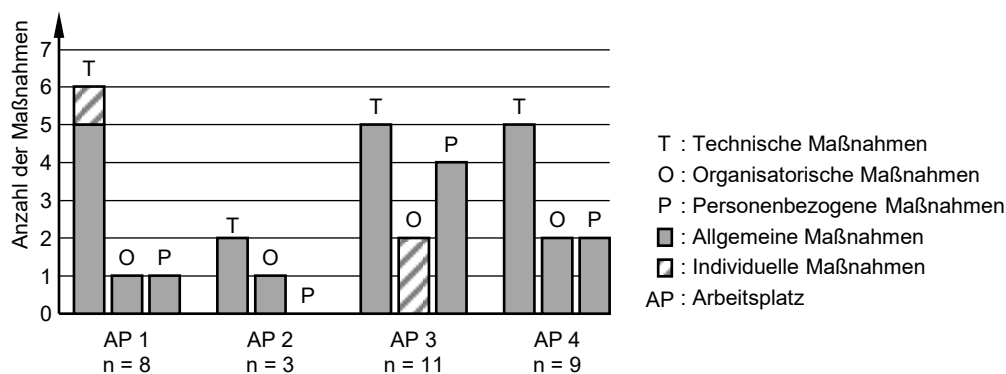
Das Montageunternehmen hat die Ergebnisse der Arbeitsplatzbewertung genutzt, um ergonomische Maßnahmen abzuleiten. Die Maßnahmenableitung hat gemeinsam mit den Prozessverantwortlichen und den Produktionsmitarbeitern für vier Arbeitsplätze stattgefunden. Allen Beteiligten wurden die Methode und die Arbeitsplatzbewertungen vorgestellt. Neben den zuvor gezeigten Gesamtbewertungen enthielt die Auswertung zudem alle Arbeitsschritte mit einem hohen ergonomischen Risiko inklusive eines Bilds des DMM und eines Video-Screenshots zur Identifizierung des Arbeitsschritts. Zusätzlich wurden den Unternehmen die Art der Belastung, die Körperregion und die Anzahl der Mitarbeiter mit hohem ergonomischem Risiko mitgeteilt (vgl. Abbildung 7-3). Um die Unternehmen in der Maßnahmenableitung zu unterstützen, standen ihnen die in Abschnitt 5.6 vorgestellten Maßnahmenkataloge zur Verfügung (vgl. Anhang A).



**Abbildung 7-3: Exemplarischer kritischer Arbeitsschritt mit a) dem Videobild, b) dem DMM und c) den kritischen Kennwerten.**

Wie die aggregierten Daten aus Abschnitt 7.1.2 bereits haben vermuten lassen, hat die Methode für beide Aufzeichnungen für die gleichen Arbeitsschritte ein hohes ergonomisches Risiko erkannt. Unterschiede in der Bewertung der beiden Aufnahmen waren auf Unterschiede in Größe, Gewicht und Lage der Werkstücke und Werkzeuge zurückzuführen. Die Bewegungsstrategie der Mitarbeiter hat hingegen eine untergeordnete Rolle gespielt.

Abbildung 7-4 zeigt, wie viele Maßnahmen die Unternehmen für jeden Arbeitsplatz abgeleitet haben. Die Maßnahmen sind nach dem TOP-Prinzip kategorisiert und jede Säule ist zudem in allgemeine und individuelle Maßnahmen unterteilt. Eine Übersicht über die durchgeführten Aufnahmen ist in Tabelle C-1 in Anhang C zu finden. Die Ergebnisse aus Abschnitt 7.1.2 sind Arbeitsplatz 1 zuzuordnen.



**Abbildung 7-4: Maßnahmenableitung - Montage**

Häufig enthielten die bewerteten Arbeitsabläufe sich wiederholende Arbeitsschritte, die zu ähnlichen Überbeanspruchungen geführt haben und daher mit nur einer ergonomischen Maßnahme abzustellen waren, wie z. B. die Umgestaltung eines Werkzeugschranks. Für jeden Arbeitsschritt, der ein hohes ergonomisches Risiko darstellt, konnte

das Unternehmen eine Lösung planen, wobei das Unternehmen überwiegend allgemeine Maßnahmen geplant hat (90 %). Der Hauptgrund hierfür war, dass Prozessschritte, die für einzelne Mitarbeiter zu einer hohen Risikobewertung geführt haben, auch bei den restlichen Mitarbeitern hohe Beanspruchungen hervorgerufen haben.

Darüber hinaus fällt der hohe Anteil an personenbezogenen Maßnahmen auf. Ein Großteil entfällt auf Mitarbeiterunterweisungen, insbesondere zur Verwendung vorhandener Hilfsmittel. Die Aufnahmen haben gezeigt, dass die Mitarbeiter dazu neigen, die bereitgestellten Hilfsmittel nicht zu nutzen, weil sie die äußere Belastung fälschlicherweise als gering einschätzen oder sich die Prozesszeit hierdurch verlängert, obwohl dies keinen Einfluss auf den Lohn hatte.

## 7.2 Logistik

Dieser Abschnitt zeigt ein Anwendungsbeispiel aus der Logistik, bei dem mehrere Mitarbeiter an zwei Arbeitsplätzen aufgenommen wurden. Abschnitt 7.2.1 stellt die Fähigkeitsprofile der Mitarbeiter vor und Abschnitt 7.2.2 geht anschließend auf die Analyseergebnisse von einem Arbeitsplatz genauer ein. Abschließend zeigt Abschnitt 7.2.3, wie das Unternehmen die Analyseergebnisse zur Maßnahmenableitung nutzen konnte.

### 7.2.1 Fähigkeitsanalyse

Die Fähigkeitsanalyse wurde mit fünf Mitarbeitern eines Unternehmens durchgeführt, die an den beiden untersuchten Arbeitsplätzen zum Einsatz kommen. Abbildung 7-5 zeigt die Ergebnisse der Mitarbeiter und folgt derselben Logik wie Abbildung 7-1. Auch hier ist nur die Anzahl der Mitarbeiter mit bzw. ohne Einschränkung in der jeweiligen Zielregion als gestapelte Säule dargestellt, um die Ergebnisse zu anonymisieren.

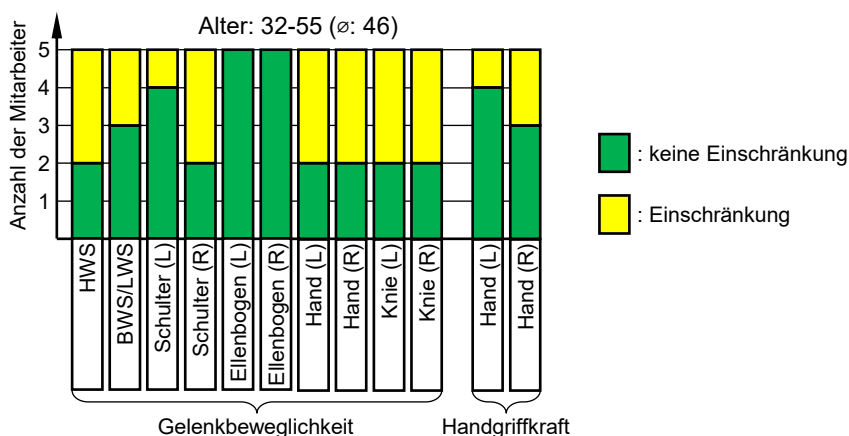


Abbildung 7-5: Fähigkeitsprofile der Logistikmitarbeiter

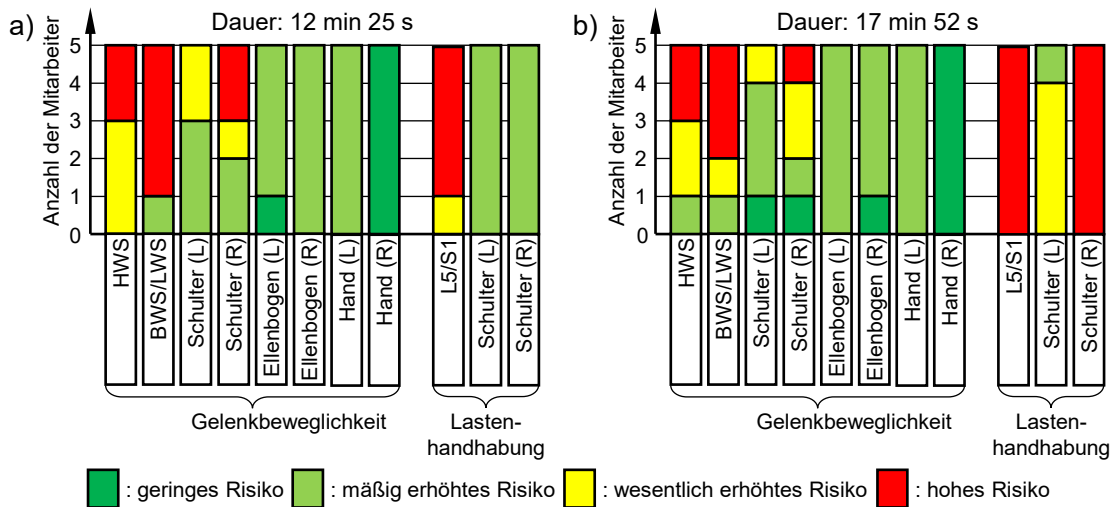
Die Fähigkeitsanalysen haben für jede erfasste Zielregion bis auf die Ellenbogen bei mindestens einem Mitarbeiter eine Einschränkung in der Beweglichkeit festgestellt. Auffällig ist, dass der Anteil an Mitarbeitern, die in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt sind, bei sechs Zielregionen (HWS, rechte Schulter, linke und rechte Hand, linkes und rechtes Knie) größer ist als der Anteil an Mitarbeitern ohne Einschränkung.

Die Methode hat für einen (linke Hand) bzw. zwei Mitarbeiter (rechte Hand) eine niedrige Handgriffkraft festgestellt, was zu einem Reduktionsfaktor  $R < 1$  geführt hat. Die Risikobewertung der Lastenhandhabung hat demnach mit reduzierten Grenzwerten stattgefunden (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Die Fähigkeitsanalyse konnte somit auch bei den Mitarbeitern des Logistikunternehmens Einschränkungen feststellen. Der hohe Anteil an Mitarbeitern mit Einschränkung unterstreicht, wie wichtig es ist, die individuellen Fähigkeiten in einer Ergonomieanalyse mit-einzubeziehen. Ein möglicher Grund hierfür ist das höhere Durchschnittsalter, das im Vergleich zum Montagebeispiel fünf Jahre höher liegt. Die Ergebnisse werden von den Aussagen der Mitarbeiter unterstützt, die bereits im Vorfeld von Beschwerden im Bereich der Schultern und der Wirbelsäule berichtet haben.

### **7.2.2 Arbeitsplatzanalyse**

Nachfolgend sind die Analyseergebnisse von einem Verpackungsarbeitsplatz vorgestellt. Inhalt der Arbeitsaufgabe ist die Entnahme von Produkten, die in einem Karton auf einer Palette bereitgestellt werden, und das anschließende Verpacken ebendieser Produkte an einem Steharbeitsplatz. Abbildung 7-6 zeigt die Analyseergebnisse des Arbeitsplatzes. Sie basieren auf der Bewegungstransformation von zwei unterschiedlichen Aufnahmen desselben Mitarbeiters, der zu unterschiedlichen Zeitpunkten vergleichbare Arbeitsaufträge ausgeführt hat. Die Länge der Aufnahmen unterscheidet sich um ca. fünf Minuten, weil der Mitarbeiter bei Aufnahme b) das Verpackungsmaterial auffüllen musste. Dieser außerplanmäßige Prozess enthielt zudem das Bewegen eines Objekts von 25 kg, während das Maximalgewicht im normalen Arbeitsauftrag bei 15 kg lag.



**Abbildung 7-6: Arbeitsplatzbewertung eines beispielhaften Logistikarbeitsplatzes: a) Aufnahme des Mitarbeiters zum Zeitpunkt t1; b) Aufnahme von demselben Mitarbeiter zum Zeitpunkt t2**

Für die erste Aufnahme des Mitarbeiters (Abbildung 7-6a) ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

- Die Zielregionen HWS, BWS/LWS und Schulter (R) sind in Bezug auf ihre Gelenkbeweglichkeit bei mehreren Mitarbeitern kritisch.
- Die Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit der linken Schulter ist bei zwei Mitarbeitern wesentlich erhöht.
- Die Beanspruchung der Beweglichkeit der Ellenbogen und Hände ist als unbedenklich einzustufen.
- Die Lastenhandhabung führt bei mindestens einem Arbeitsschritt zu einem hohen Risiko an L5/S1 für 80 % der Mitarbeiter.
- Die Gelenkmomente der Schultern liegen in einem akzeptablen Bereich.

Die zweite Aufnahme desselben Mitarbeiters (Abbildung 7-6b) führt zu einer ähnlichen Risikobewertung:

- Die Zielregionen HWS, BWS/LWS und Schulter (R) sind in Bezug auf ihre Gelenkbeweglichkeit bei mindestens einem Mitarbeiter kritisch.
- Die Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit der linken Schulter ist bei einem Mitarbeiter wesentlich erhöht.
- Die Beanspruchung der Beweglichkeit der Ellenbogen und Hände ist als unbedenklich einzustufen.
- Die Lastenhandhabung führt bei mindestens einem Arbeitsschritt zu einem hohen Risiko an L5/S1 für alle Mitarbeiter.

- Die Gelenkmomente der Schultern sind hoch und die Wahrscheinlichkeit einer Überbeanspruchung ist wesentlich erhöht (linke Schulter) bzw. hoch (rechte Schulter).

Die Arbeitsplatzbewertungen zeigen hinsichtlich der Gelenkbeweglichkeit ähnliche Ergebnisse. Die Zielregionen HWS und BWS/LWS sind bei mehreren Mitarbeitern überbeansprucht und auch die auftretenden Gelenkwinkel der rechten Schulter führen bei einzelnen Mitarbeitern zu einem hohen ergonomischen Risiko. Die Risikobewertung hinsichtlich der Lastenhandhabung führt jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen: Während in Aufnahme a) nur ein geringes Risiko für die linke und rechte Schulter besteht, hat die Methode in Aufnahme b) ein erhöhtes und hohes Risiko festgestellt. Der Grund hierfür ist das höhere Lastgewicht beim Auffüllen des Verpackungsmaterials, das hohe Gelenkmomente in den Schultern und L5/S1 zur Folge hat. Da die Gesamtbewertung des Arbeitsplatzes die höchste auftretende Risikokategorie bei der Lastenhandhabung darstellt, führen diese außerordentlichen Prozessschritte zu einer ungünstigeren Gesamtbewertung. Die Abweichung zwischen den beiden Aufnahmen unterstreicht, wie wichtig eine umfassende Bewertung der Arbeitsabläufe ist.

Berücksichtigt man die unterschiedlichen Arbeitsinhalte der Aufnahmen, lässt sich festhalten, dass die entwickelte Methode auch an den analysierten Logistikarbeitsplätzen zu validen, reproduzierbaren Ergebnissen geführt hat. Die Unterschiede in der Risikobewertung der Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit zeigen zudem den Bedarf einer individuellen Ergonomieanalyse: Auch in diesem Beispiel würde die Aufnahme nur eines Mitarbeiters ohne Bewegungstransformation und individuelle Risikobewertung zu einer Unterschätzung des Risikos für mehrere Mitarbeiter führen.

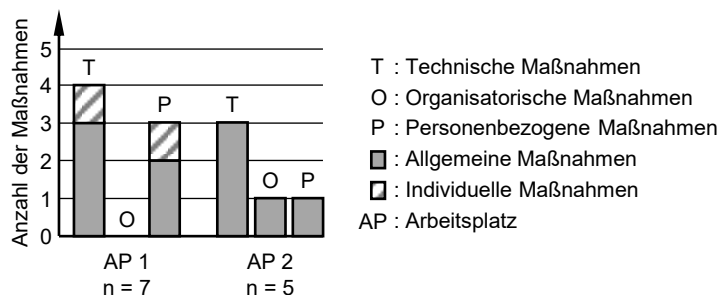
### 7.2.3 Maßnahmenableitung

Auf Basis der Risikobewertung hat das Logistikunternehmen ergonomische Verbesserungsmaßnahmen beschlossen. Die Maßnahmenableitung hat in diesem Fall lediglich mit dem Prozessverantwortlichen stattgefunden. Neben den zuvor gezeigten Arbeitsplatzbewertungen wurden wie im Montagebeispiel alle kritischen Arbeitsschritte inklusive eines Bilds des DMM und eines Video-Screenshots zur Identifizierung des Arbeitsschritts zur Verfügung gestellt. Zusätzlich waren die Art der Belastung, die Körperregion und die Anzahl der Arbeitnehmer mit hoher Beanspruchung angegeben.

Für die Risikobewertung der zwei Arbeitsplätze wurden drei Aufnahmen von zwei Mitarbeitern (Arbeitsplatz 1) bzw. zwei Aufnahmen von zwei Mitarbeitern (Arbeitsplatz 2) ausgewertet. Auf Arbeitsschritzebene hat die Methode bei gleichem Arbeitsinhalt die gleichen Arbeitsschritte als kritisch identifiziert. Die Analyse hat mehrere Arbeitsschritte aufgedeckt, die zu einer Überbeanspruchung eines Mitarbeiters mit einer eingeschränkten

Gelenkbeweglichkeit führen. Die Berücksichtigung der individuellen Mitarbeiterfähigkeiten bei der Risikobewertung hat demnach individuellen Verbesserungsbedarf aufgezeigt, was die Notwendigkeit einer individuellen Risikobewertung unterstreicht.

Abbildung 7-7 zeigt die Anzahl der beschlossenen Maßnahmen und unterteilt sie in technische, organisatorische und personenbezogene sowie allgemeine und individuelle Maßnahmen. Eine Übersicht über die durchgeführten Aufnahmen ist in Tabelle C-2 in Anhang C zu finden. Die Ergebnisse aus Abschnitt 7.2.2 sind Arbeitsplatz 1 zuzuordnen.



**Abbildung 7-7: Maßnahmenableitung - Logistik**

Insgesamt hat das Unternehmen zwölf Maßnahmen für die zwei Arbeitsplätze beschlossen. Auch in diesem Beispiel sticht hervor, dass das Unternehmen vor allem allgemeine Maßnahmen zur Arbeitsplatzverbesserung gewählt hat (83 %). Der hohe Anteil an personenbezogenen Maßnahmen fällt auf Mitarbeiterunterweisungen zurück, welche die Mitarbeiter zur Nutzung vorhandener Hilfsmittel anweisen oder ergonomisch günstigere Bewegungsstrategien vorgeben. Außerdem haben die Mitarbeiter die vorhandenen Möglichkeiten, den Arbeitsplatz an die Körpergröße anzupassen, nicht genutzt. Naheliegender erscheint zunächst, dass die individuelle Bewegungsstrategie und die anschließende Bewegungstransformation die Ergebnisse beeinflusst haben könnten. Da alle Mitarbeiter auf die Hilfsmittel verzichtet haben, ist dies jedoch auszuschließen.

Generell konnte das Unternehmen die ergonomisch kritischen Arbeitsschritte mit einfachen Maßnahmen beseitigen und für lediglich einen Arbeitsschritt war keine direkte Abstellmaßnahme zu finden, weil dies eine bauliche Maßnahme erfordert hätte.

### 7.3 Bewertung der Methode

Dieser Abschnitt bewertet die Methode und diskutiert die Defizite und Anwendungsbeschränkungen. Neben den zuvor vorgestellten Evaluationsbeispielen aus der Industrie greift das Kapitel die in Abschnitt 3.2 gestellten Anforderungen und die Teilevaluationen aus den Konzeptkapiteln auf. Es sei darauf hingewiesen, dass die Methode bisher nur an einer kleinen Stichprobe getestet werden konnte. Die Anwendung zeigt somit bisher nur

eine Tendenz auf, die in einer breiteren Anwendung bestätigt werden müsste. Zudem war das Feedback der Produktionsmitarbeiter und Prozessverantwortlichen nur informell. Um die Methode abschließend zu bewerten, ist in einer breiten Anwendung das Feedback in Form von standardisierten Fragebögen einzuholen.

**Bewertung der Fähigkeitsanalyse.** Die Anwendung in der Praxis hat gezeigt, dass die Fähigkeitsanalyse in der Lage ist, Einschränkungen in der Gelenkbeweglichkeit und der Handgriffkraft aufzudecken. Der Aufwandaufwand wurde zwar nicht separat erfasst, jedoch gab es keine Auffälligkeiten gegenüber der Teilevaluation aus Abschnitt 4.5. Daher ist der Aufwand als gering zu bewerten. Die Fähigkeitsanalyse stellt jedoch einen Kompromiss aus Erfassungsaufwand und Genauigkeit dar:

Die Erfassung der Bewegungsumfänge hat sich als gutes Mittel bewährt, um abzuschätzen, welche Körperhaltungen ein Mitarbeiter am Arbeitsplatz einnehmen kann. Zusätzlich bietet der Vergleich mit Literaturwerten die Möglichkeit, die Beweglichkeit unabhängig vom Arbeitsplatz einzuordnen und mögliche Einschränkungen festzustellen.

Wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, liegt der Zeitaufwand der gesamten Fähigkeitsanalyse unter 30 Minuten und ermöglicht somit die Analyse ganzer Unternehmen oder Fertigungsbereiche. Potenzial für eine weitere Verkürzung der Analyse bieten Erfassungssysteme, die weniger Vorbereitungsaufwand erfordern. Dies ist zum Zeitpunkt dieser Arbeit zwar technologisch noch nicht möglich, in Zukunft sollten jedoch kamerabasierte markerlose Motion-Capture-Systeme die notwendige Genauigkeit bieten, den Zeitaufwand um weitere 15 Minuten zu senken.

In Summe ist die Anforderung einer aufwandsarmen Aufnahme der arbeitsbezogenen physischen Leistungsfähigkeit (A1) als erfüllt anzusehen. Die erfassten Fähigkeitsprofile haben zudem gezeigt, wie wichtig die individuelle Erfassung der Mitarbeiterfähigkeiten ist. Obwohl die Fähigkeitsanalyse nicht die Tiefe einer FCE bietet, konnten auch die einfachen Erfassungsmethoden Einschränkungen bei den Produktionsmitarbeitern feststellen.

**Bewertung der Arbeitsplatzanalyse.** Die entwickelte Arbeitsplatzanalyse erlaubt eine Bewertung der Belastung am Arbeitsplatz in Bezug auf die Lastenhandhabung, die Gelenkbeweglichkeit und statische Körperhaltungen. Die Praxisanwendung hat gezeigt, dass sie valide Ergebnisse bei industriellen Montage- und Logistikarbeitsplätzen liefert.

Das Hauptziel der Arbeitsplatzanalyse war es, die Fähigkeiten der Mitarbeiter in die Belastungsbewertung einfließen zu lassen, um das ergonomische Risiko für jeden Mitarbeiter individuell abschätzen zu können. Hierzu hat die Methode bekannte ergonomische Bewertungsverfahren aufgegriffen und mithilfe des Fähigkeitsprofils individualisiert. Die

Praxisanwendung hat gezeigt, dass dieses Vorgehen in der Lage ist, kritische Arbeitsplätze und -schritte für Mitarbeiter mit physischen Einschränkungen zu identifizieren, sowohl für Belastungen durch Lastenhandhabung als auch durch dynamische und statische Körperhaltungen. Der Arbeitsablauf konnte zudem für jede Zielregion einzeln bewertet werden, wobei die Bewertung der Lastenhandhabung nur für die Schultern und L5/S1 erfolgt, da hier eine Überbeanspruchung am wahrscheinlichsten ist. Auch bei den Bewertungsverfahren ist jedoch darauf hinzuweisen, dass sie zwar auf bekannten Zusammenhängen basieren, eine ausgiebige Evaluation aber noch fehlt. Für den Industrieinsatz sind extensive Langzeitstudien notwendig, welche die getroffenen Annahmen zur Individualisierung überprüfen. Dennoch hat die prototypische Umsetzung gezeigt, dass es mit den heute verfügbaren Technologien möglich ist, Arbeitsplätze mit geringem Aufwand gemäß der individuellen Fähigkeiten ergonomisch zu bewerten. Mit der ergonomischen Bewertung beliebiger Körperhaltungen für jede Zielregion und jede Belastungsart erreicht die Methode zudem einen hohen Detaillierungsgrad. Die Anforderung der Berücksichtigung der individuellen Fähigkeiten bei der Arbeitsplatzbewertung (A2) und die Anforderung einer hohen Detaillierung bei der Arbeitsplatzbewertung (A3) sind daher erfüllt.

Der Aufwand der Methode ist als gering einzuschätzen. Da die Unternehmen keine Vorbereitungsmaßnahmen treffen mussten, entsprach der Zeitaufwand der Arbeitsplatzaufnahmen der Durchführungszeit. Auch die Datennachbereitung und -auswertung lag in einem Zeitrahmen, der eine zeitnahe Maßnahmenableitung auf Basis der Analyseergebnisse ermöglicht. Hierbei muss der Methodenanwender lediglich die Zeitpunkte der Lastwirkung überprüfen und die kritischen Arbeitsschritte herausstellen, was in den Praxisbeispielen einen Zeitaufwand von bis zu drei Stunden pro Arbeitsplatz umfasst hat.

Die Praxisanwendung hat zudem gezeigt, dass Unternehmen die Analyseergebnisse zur gezielten Ableitung von ergonomischen Verbesserungsmaßnahmen nutzen konnten. Das Feedback vonseiten der Prozessverantwortlichen war hierbei durchweg positiv: Sie gaben an, dass die Ergebnisse leicht zu verstehen waren, und dass es direkt ersichtlich war, ob und warum ein ergonomisches Risiko bei einem Arbeitsschritt vorlag, auch ohne ergonomisches Vorwissen. Hierbei habe insbesondere die separate Bewertung der Zielregionen geholfen, mit der eine Überbelastung direkt einer Bewegung zugeordnet werden konnte.

Die bereitgestellten Maßnahmenkataloge haben den Unternehmen vor allem beim Verständnis der Wirkzusammenhänge geholfen. Für die beschlossenen Abstellmaßnahmen waren sie häufig nicht notwendig, da diese direkt ersichtlich waren. Ihr Nutzen hat sich jedoch bei komplexen Bewegungen gezeigt, bei denen notwendige Verbesserungsmaßnahmen nicht direkt ersichtlich waren.

Bei der Maßnahmenableitung durch die Unternehmen ist zudem aufgefallen, dass sie vor allem allgemeine Abstellmaßnahmen beschlossen haben. Dies ist darauf zurückzuführen,

dass die Belastungssituation bei einer Überbeanspruchung weniger Mitarbeiter für die restlichen Mitarbeiter in der Regel ebenfalls erhöht war. Dennoch konnte die Methode Bewegungen identifizieren, die für einzelne Mitarbeiter aufgrund ihrer Körpergröße und körperlichen Einschränkungen zu einer Überbeanspruchung geführt haben. Hier konnten die Unternehmen einfache Maßnahmen beschließen, die eine komplette Umgestaltung des Arbeitsplatzes überflüssig gemacht haben, z. B. indem sie einen Tritt für kleinere Mitarbeiter bereitgestellt haben.

Insgesamt ist die Anforderung, dass die Arbeitsplatzanalyse bei der Ableitung von ergonomischen Maßnahmen unterstützen soll (A4), als erfüllt zu bewerten. Dies ist im Anwendungsbeispiel vor allem auf die Ergebnisdarstellung zurückzuführen. Ein Test des entwickelten Vorgehens zur systematischen Maßnahmenableitung wie in Abschnitt 5.6 beschrieben, steht noch aus.

Die Produktionsmitarbeiter haben ebenfalls positives Feedback gegeben: Sie schätzten insbesondere, dass die Methode auf ihre individuellen Fähigkeiten und ihre Körpergröße eingeht. Es ist anzumerken, dass sie das Motion-Capture-System bei ihrer Arbeit zwar nicht gestört hat, aber für manche Mitarbeiter ein Hindernis war. Die Sensoren haben hier abschreckend gewirkt, weil sie die Aufmerksamkeit der Kollegen erregt haben und die Erfassung von Produktivitätsdaten vermutet wurde.

**Bewertung der Bewegungstransformation.** Die Bewegungstransformation ist ein notwendiges Werkzeug, um die Skalierbarkeit der Methode zu garantieren. Ihr Praxiseinsatz hat gezeigt, dass sie auch auf Basis eines Bewegungsablaufs realistische Bewegungsabläufe für eine Vielzahl von Mitarbeitern erstellen kann. Nur so war es möglich, die Arbeitsplätze der Unternehmen für alle Mitarbeiter individuell zu bewerten. Insbesondere am Montagebeispiel wird dies direkt ersichtlich: Bei einer Prozessdauer von ca. 41 Minuten würde sich für die Aufnahme von acht Mitarbeitern ein Zeitaufwand von 328 Minuten für die Aufnahmen ergeben. Außerdem verringert sich der Nachbereitungsaufwand um denselben Faktor im Vergleich zur Aufnahme aller Mitarbeiter, weil die Zeitpunkte der einzelnen Bewegungen für alle Mitarbeiter übereinstimmen und die Aufnahmen direkt vergleichbar sind.

Obwohl die Bewegungstransformation realistische Bewegungsabläufe erzeugt, hat die in Abschnitt 6.4 beschriebene Versuchsreihe gezeigt, dass die berechneten Gelenkwinkel bei komplexen Bewegungen stark von den Gelenkwinkeln echter Aufnahmen abweichen können. Dies ist vor allem auf die individuellen Bewegungsstrategien zurückzuführen, die sich einerseits schon zwischen den wiederholten Aufnahmen derselben Person unterscheiden. Andererseits hängt die gewählte Bewegungsstrategie jedoch auch von der Körpergröße ab: Z. B. würde eine große Person bestimmte Bewegungen grundsätzlich anders

ausführen als eine kleine Person. Vor diesem Hintergrund ist zu beachten, dass das Verhalten des aufgenommenen Mitarbeiters die Analyseergebnisse der weiteren Mitarbeiter maßgeblich beeinflusst.

Trotz der genannten Einschränkungen erfüllt die vorgestellte Lösung auch die Anforderung der aufwandsarmen Arbeitsplatzbewertung für verschiedene Körpermaße (A5). Die individualisierten Bewegungsabläufe erzeugen valide Ergebnisse und konnten zur Identifikation kritischer Arbeitsschritte genutzt werden, die ansonsten verborgen geblieben wären. Da der verwendete Inverse-Kinematik-Solver des Software-Prototyps eine Free-ware-Lösung ist, die nicht für ergonomische Belastungsanalysen optimiert ist, birgt die Verwendung einer professionellen Lösung hier weiteres Verbesserungspotenzial.

### 8 Schlussbetrachtung

Dieser Abschnitt fasst zunächst die Arbeit zusammen (Abschnitt 8.1) und gibt im Anschluss einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf und Entwicklungspotenziale (Abschnitt 8.2)

#### 8.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine Methode zur Analyse der Arbeitsplatzergonomie vor, welche die Fähigkeiten des individuellen Mitarbeiters berücksichtigt. Hierzu kommt ein Motion-Capture-System zum Einsatz, das sowohl zur Ermittlung der Beweglichkeit der Mitarbeiter als auch zur Erfassung der Bewegungsabläufe am Arbeitsplatz genutzt wird.

Im ersten Schritt erstellt die Methode in unter 30 Minuten ergonomische Fähigkeitsprofile der Mitarbeiter. Hierzu führt der Mitarbeiter 14 Bewegungsübungen aus, bei denen er ein Motion-Capture-System trägt. Der Software-Prototyp bestimmt aus den Bewegungsdaten mithilfe der Neutral-Null-Methode automatisch die Bewegungsumfänge der Zielregionen, die bei Montage- und Logistiktätigkeiten besonders beansprucht werden. Zudem erfasst die Methode die Handgriffkraft als Indikator für eine verminderte Belastbarkeit.

Die Methode nutzt die Fähigkeitsprofile, um die Belastung am Arbeitsplatz mitarbeiterindividuell zu bewerten. Sie erfasst den Bewegungsablauf und die Lastgewichte am Arbeitsplatz und berechnet Belastungskennwerte, um das ergonomische Risiko abzuschätzen. Mithilfe der erfassten Mitarbeiterfähigkeiten individualisiert die Methode bekannte Grenzwerte und berücksichtigt so mögliche körperliche Einschränkungen der Mitarbeiter. Ein zielregions- und belastungsspezifischer Maßnahmenkatalog hilft dem Anwender, geeignete Lösungen zu finden, falls bei einem Arbeitsplatz eine Überbeanspruchung der Mitarbeiter auftritt.

Um eine aufwandsarme Bewertung einer Vielzahl von Mitarbeitern zu ermöglichen, bietet die Methode die Option einer Bewegungstransformation. Sie erstellt auf Basis eines aufgenommenen Mitarbeiters individuelle Bewegungsabläufe für weitere Mitarbeiter, deren Fähigkeitsprofile vorliegen. So können Unternehmen individuelle Arbeitsplatzbewertungen erstellen, ohne jeden Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz aufnehmen zu müssen.

Die Methode wurde in Montage- und Logistikunternehmen mit ausgewählten Arbeitsplätzen getestet. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Methode Fähigkeitseinschränkungen bei Produktionsmitarbeitern feststellen kann und die Belastung an Industriearbeitsplätzen mitarbeiterindividuell bewerten kann. Die Unternehmen konnten auf Basis der Ergebnisse gezielt Arbeitsplatzverbesserungen beschließen, ohne dass hierzu tiefergehendes ergonomisches Vorwissen nötig war.

### 8.2 Ausblick

Die Methode wurde zwar erfolgreich getestet, jedoch bestehen weitere Forschungsbedarfe und Entwicklungspotenziale.

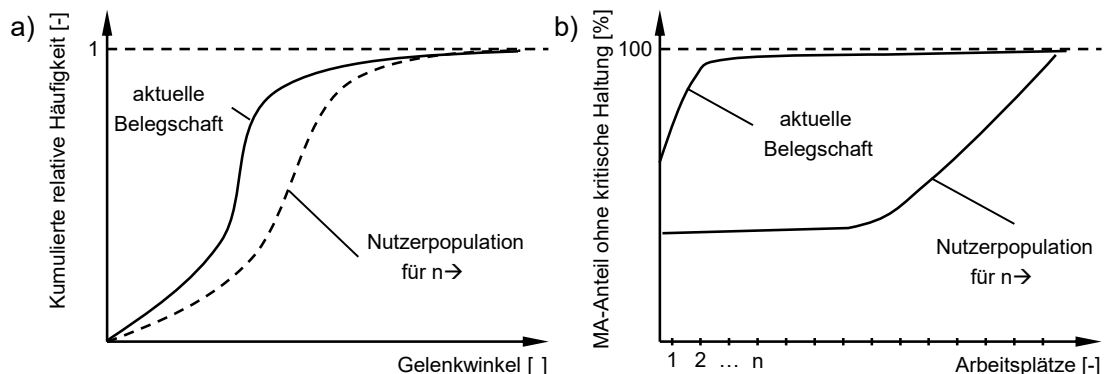
Die entwickelte Lösung ist im jetzigen Stand ein Prototyp, der zeigt, dass es mit bestehenden Technologien möglich ist, eine mitarbeiterindividuelle Ergonomieanalyse für die Produktion zu gestalten. Hierzu baut die Methode auf bekannten Grenzwerten und Bewertungsverfahren auf. Vor einer breiten Anwendung der Methode wäre es sinnvoll, die gewählten Ansätze zur Individualisierung in ausführlichen Studien zu überprüfen.

Insbesondere kann die alleinige Verwendung der Handgriffkraft als Maß für die körperliche Belastbarkeit offensichtlich nicht die Genauigkeit detaillierter FCE bieten. Es gibt zwar verschiedene Studien, die eine positive Korrelation zwischen der Gesamtmuskulaturkraft und der Handgriffkraft festgestellt haben, aber die Beziehung zwischen Handgriffkraft und den Grenzwerten zur Belastungsbewertung konnten im Zuge dieser Arbeit nicht untersucht werden. Der Ansatz, allgemeine Grenzwerte mithilfe der Handgriffkraft über einen Reduktionsfaktor zu individualisieren, ist zwar naheliegend, aber für eine industrielle Anwendung in umfangreichen Langzeitstudien zu überprüfen und ggf. anzupassen. Da diese Individualisierung die Grenzwerte nur herabsetzt und somit zu einer konservativeren Risikobewertung führt, ist eine Anwendung der Methode bereits jetzt gefahrlos möglich.

Anstelle der Handgriffkraft ist beispielsweise auch eine Erfassung weiterer Kraftwerte denkbar, was die Aufnahmedauer zwar verlängert, aber gleichzeitig eine höhere Genauigkeit bietet. Vor dem Hintergrund, dass bestehende Methoden die individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter nicht berücksichtigen, ist die Individualisierung mittels Handgriffkraft bereits positiv zu bewerten. Somit würde die breite Anwendung der Methode bereits im jetzigen Zustand Probleme aufdecken, die sonst unerkannt bleiben würden, ohne die Mitarbeiter zu gefährden.

Darüber hinaus lag der Fokus auf der Entwicklung eines funktionalen Gesamtsystems. Entsprechend wurden für die einzelnen Analysen einfache und frei verfügbare Ansätze genutzt und miteinander kombiniert, die Limitationen mit sich bringen. Es ist auch darauf hinzuweisen, dass technologischer Fortschritt mittelfristig die Verwendung von markerlosen 3D-Kameras für die Fähigkeitsanalyse und langfristig für die Arbeitsplatzanalyse ermöglichen könnte. Ohne die Notwendigkeit, den Körper zu vermessen und die Sensoren zu platzieren, kann der Zeitaufwand für die Fähigkeitsanalyse auf 10-15 Minuten pro Person reduziert werden.

Ein hohes Potenzial bietet die durchgängige Anwendung der Methode in der Industrie in Form eines Ergonomie-Controllings. Beispielsweise ist es denkbar, eine Fähigkeitsdatenbank für verschiedene Nutzerpopulationen analog zu den anthropometrischen Datenbanken zu erstellen. Abbildung 8-1a) zeigt, wie Unternehmen eine derartige Datenbank zur Einordnung der erfassten Fähigkeiten der aktuellen Belegschaft im Vergleich zum globalen Durchschnitt nutzen können. Treten z. B. bei der Belegschaft vermehrt Einschränkungen einer bestimmten Zielregion auf, liegt es nahe, dass diese von den Arbeitsplätzen stark beansprucht wird und bei zukünftigen Arbeitsplatzverbesserungen fokussiert werden sollte. Um es gar nicht erst zu Einschränkungen kommen zu lassen, könnten Unternehmen zudem bei der Gestaltung der Bewegungsabläufe die Erkenntnisse aus der Fähigkeitsdatenbank berücksichtigen und die Arbeitsplätze für eine größere Nutzerpopulation den Fähigkeiten entsprechend bewerten. Abbildung 8-1b) zeigt, wie sich die individuellen Eigenschaften der aktuellen Belegschaft (Körpergröße, Belastbarkeit, Beweglichkeit) auf die Arbeitsplatzbewertungen im Vergleich zu einer größeren Nutzerpopulation auswirken können. In dem fiktiven Beispiel sind die Arbeitsplätze für die aktuelle Belegschaft optimiert, z. B. weil diese überdurchschnittlich groß ist. Die Bewertungsergebnisse für die globale Nutzerpopulation zeigen jedoch, dass die Belastung bei einer durchschnittlichen Belegschaft häufiger zu einer Überbeanspruchung führt. So können Unternehmen früh weitere Potenziale zur Arbeitsplatzverbesserung identifizieren.



**Abbildung 8-1: Potenzial eines Ergonomie-Controllings: a) Einordnung der Fähigkeiten der aktuellen Belegschaft; b) Einordnung der Arbeitsplatzbewertungen der aktuellen Belegschaft**

Darüber hinaus kann die Methode für weitere Anwendungszwecke erweitert werden, die in dieser Arbeit noch nicht betrachtet wurden. Beispielsweise unterstützt die Methode bisher nur die Analyse von Steharbeitsplätzen. Zudem ist der Einsatz in weiteren Branchen zu prüfen. Aktuell kam die Methode lediglich in Montage- und Logistikunternehmen zum Einsatz. Denkbar ist die Anwendung in weiteren Branchen, in denen die Mitarbeiter manuelle Arbeit ausüben, wie zum Beispiel in Pflegeberufen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [ALLE04] Alles, T.; Czarny, M.; Dalitz, S.; Flach, T.; Froböse, I.; Gagel, A.; Glatz, A.; Greve, J.; Hetzel, C.; Jochheim, K.-A.; Kaiser, H.; Kersting, M.; Landau, K.; Mozdzanowski, M.; Nellessen, G.; Röhrig, A.; Schaub, K.; Schian, H.-M.; Schmidt, C.; Schüle, K.; Sinn-Behrendt, A.; Weißert-Horn, M.; Wellmann, H.; Winter, G.: Prävention und Rehabilitation zur Verhinderung von Erwerbsminderung, Köln, Juli 2004
- [ANGL00] Anglin, C.; Wyss, U. P.: Review of arm motion analyses. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 214. Jg., 2000, Nr. 5, S. 541–555
- [ARIS11] Aristidou, A.; Lasenby, J.: FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. In: Graphical Models. 73. Jg., 2011, Nr. 5, S. 243–260
- [ASTA17] Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) (Juli 2017). Technische Regeln für Arbeitsstätten, Gefährdungsbeurteilung (Juli 2017)
- [BAUA19] BAuA: MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz, Dortmund. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2019
- [BAUA22a] BAuA (Hrsg.): Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2021, Dortmund, 2022
- [BAUA22b] Gefährdungsbeurteilung mit den Leitmerkmalmethoden - Basis-Check und Einstiegsscreening bei körperlicher Belastung. URL: <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/pdf/Einstiegsscreening.html> [Stand: 24.02.2023]
- [BOKR12] Bokranz, R.; Landau, K.: Handbuch Industrial Engineering, Produktivitätsmanagement mit MTM. 2. Aufl., Stuttgart. Schäffer-Poeschel, 2012
- [BONI19] Bonin, D.: Entwicklung eines Verfahrens zur digitalen Erfassung von Körperhaltungen und Bewegungsmustern. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2019

- [BRAN09] Brandenburg, U.: Betriebliches Fehlzeiten-Management : Instrumente und Praxisbeispiele für erfolgreiches Anwesenheits und Vertrauensmanagement. 2., überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [BRAN16] Brandl, C.; Bonin, D.; Mertens, A.; Wischniewski, S.; Schlick, C. M.: Methodik zur Unterstützung des ergonomischen Interventionsprozesses am Beispiel einer automatisierten OWAS-basierten Generierung von Vorschlägen zur technischen Gestaltung von Arbeitsplätzen. In: Arbeit in komplexen Systemen - digital, vernetzt, human?! 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen University, Institut für Arbeitswissenschaft (IAW), 2.-4. März 2016. Dortmund: GfA-Press, 2016
- [BROS20] Brosche, J.; Wackerle, H.; Lödding, H.: Creating a Worker-Individual Physical Ability Profile Using a Low-Cost Depth Camera. In: Nyhuis, P.; Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2020): Hannover : Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, 2020, S. 269–276
- [BROS21] Brosche, J.; Wackerle, H.; Augat, P.; Lödding, H.: A Learning Assistance System for the Ergonomic Behavioural Prevention in Production. In: Sihn, W.; Schlund, S. (Hrsg.): Competence development and learning assistance systems for the data-driven future: GITO, 2021, S. 93–108
- [BROS22] Brosche, J.; Lödding, H.; Wackerle, H.; Augat, P.: Ein Lernassistenzsystem zur Verbesserung der Ergonomie. In: Industrie 4.0 Management : Gegenwart und Zukunft industrieller Geschäftsprozesse. 2. Jg., 2022
- [BRUD20] Bruder, R.; Schaub, K.; Sinn-Behrendt, A.; Oberle, M.; Berg, K.; Nickolai, M.; Wakula, J.: Weiterentwicklung und Evaluierung von Ansätzen zur Gefährdungsanalyse bei physischen Belastungen für die Methodenebene Experten-Screening. In: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Report 3/2020. MEGAPHYS: Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz, 2020, S. 12–268
- [BULL94] Bullinger, H.-J.: Ergonomie, Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung, Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 1994

- [CHAR16] Charland, J.: Virtual Ergonomics- Vision of the Future. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 279–284
- [DAEN02] Daenzer, W. F.; Huber, F. (Hrsg.): Systems engineering, Methodik und Praxis. 11., durchgesehene Auflage, Zürich. Verlag Industrielle Organisation, 2002
- [DGUV14] DGUV (Hrsg.): Begutachtungsempfehlung für die Berufskrankheit Nummer 2112 (Gonarthrose), Berlin, 2014
- [DGUV22] DGUV (Hrsg.): DGUV Information 208-033, Muskel-Skelett-Belastungen – erkennen und beurteilen, Berlin, 2022
- [DIN33402] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): DIN 33402-2:2020-12. Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [DOCK12] Dockrell, S.; O'Grady, E.; Bennett, K.; Mullarkey, C.; Mc Connell, R.; Ruddy, R.; Twomey, S.; Flannery, C.: An investigation of the reliability of Rapid Upper Limb Assessment (RULA) as a method of assessment of children's computing posture. In: Applied Ergonomics. 43. Jg., 2012, Nr. 3, S. 632–636
- [ELLE10a] Ellegast, R.; Hermanns, I.; Schiefer, C.: Feldmesssystem CUELA zur Langzeiterfassung von Bewegungen an Arbeitsplätzen. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 64. Jg., 2010
- [ELLE10b] Ellegast, R. P.: Quantifizierung physischer Belastungen am Arbeitsplatz. In: Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie. 60. Jg., 2010, Nr. 11, S. 386–389
- [ELVA20] Elvan, A.; Ozyurek, S.: Principles of kinesiology. In: Angin, S.; Şimşek, I. E. (Hrsg.): Comparative Kinesiology of the Human Body: Elsevier, 2020, S. 13–27
- [GHEZ07] Ghezel-Ahmadi, K.; Schaub, K.; Landau, K.: Verfahren (IAD BkB) zur Bewertung von körperlichen Belastungen am Arbeitsplatz zur Ermittlung von ERA-Belastungszulagen. In: Kompetenzentwicklung in realen und virtuellen Arbeitssystemen. Dokumentation des 53. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses. Dortmund: GfA Press, 2007, S. 515–520

- [GRAB20] Grabner, C.: Methodengestütztes Produktivitätsmanagement - Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens. Technische Universität Hamburg, 2020
- [GUDE09] Gudehus, T. C.: Entwicklung eines Verfahrens zur ergonomischen Bewertung von Montagetätigkeiten durch Motion-Capturing, Kassel. Kassel Univ. Press, 2009
- [HAGG13] Haggag, H.; Hossny, M.; Nahavandi, S.; Creighton, D. (Hrsg.): Real Time Ergonomic Assessment for Assembly Operations Using Kinect. 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2013
- [HALB17] Halbe-Haenschke, B.: Informieren: Was ist BGM. In: Halbe-Haenschke, B.; Reck-Hog, U. (Hrsg.): Die Erfolgsstrategie für Ihr BGM. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 17-31
- [HEHE11] Hehenberger, P.: Computerunterstützte Fertigung : eine kompakte Einführung, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- [HIGN00] Hignett, S.; McAtamney, L.: Rapid Entire Body Assessment (REBA). In: Applied Ergonomics. 31. Jg., 2000, Nr. 2, S. 201
- [HORE13] Horejsi, P.; Gorner, T.; Kurkin, O.; Polasek, P.; Januska, M.: Using Kinect Technology Equipment for Ergonomics. In: MM Science Journal. 2013. Jg., 2013, Nr. 01, S. 389–392
- [IEA22] International Ergonomics Association: What Is Ergonomics? URL: <https://iea.cc/what-is-ergonomics/> [Stand: 15.08.2022]
- [IQPR00] Institut für Qualitätssicherung in Prävention und Rehabilitation GmbH an der Deutschen Sporthochschule Köln: IMBA Einführung, Das Instrument für Fachkräfte der beruflichen Rehabilitation und Integration. URL: <http://www.imba.de/downloads.html>
- [IQPR23] Assessment-Info des IQPR. URL: <https://www.assessment-info.de/> [Stand: 24.02.2023]
- [ISO26800] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): DIN EN ISO 26800:2011-11. Ergonomie - Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte (ISO 26800:2011), Deutsche Fassung EN ISO 26800:2011. Beuth Verlag GmbH, Berlin

- [ISO6385] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): DIN EN ISO 6385:2016-12. Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO\_6385:2016), Deutsche Fassung EN ISO 6385:2016. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [JAEG13] Jaeger, C.: Leistungsfähig sein und bleiben, Hinweise für Unternehmen und Beschäftigte. In: Betriebspraxis und Arbeitsforschung, 2013, Nr. 216, S. 16–23
- [JÄGE00] Jäger, M.; Luttmann, A.; Göllner, R.; Laurig, W.: Der Dortmunder: Biomechanische Modellbildung zur Bestimmung und Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule bei Lastenhandhabungen. In: Prävention von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Erkrankungen. Monade, Leipzig, 2000, S. 105–124
- [JÄGE19] Jäger, M.: Die „Revidierten Dortmunder Richtwerte“. In: Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie. 69. Jg., 2019, Nr. 5, S. 271–289
- [JÄGE20] Jäger, M.; Jordan, C.: Gefährdungsbeurteilung „Muskel-Skelett-System – Weiterentwicklung und Evaluierung von Methoden und Werkzeugen zur Gefährdungsanalyse bei physischen Belastungen hinsichtlich der biomechanischen Auswirkungen auf das Muskel-Skelett-System und insbesondere die Wirbelsäule“. In: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Report 3/2020. MEGAPHYS: Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz, 2020, S. 411–817
- [JÜRGG01] Jürgens, W.-W.; Mohr, D.; Pangert, R.; Pernack, E.-F.; Schultz, K.; Steinberg, U.: Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Heben und Tragen von Lasten. 4., überarb. Aufl., Potsdam. LASI, 2001
- [JÜRGG02] Jürgens, W.-W.; Mohr, D.; Pangert, R.; Pernack, E.-F.; Schultz, K.; Steinberg, U.: Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Ziehen und Schieben von Lasten, Saarbrücken. LASI, 2002
- [KAIS00a] Kaiser, H.; Kersting, M.; Schian, H. M.: Der Stellenwert des Arbeitssimulationsgerätes ERGOS als Bestandteil der leistungsdiagnostischen Begutachtung. In: Die Rehabilitation. 39. Jg., 2000, Nr. 3, S. 175–184

- [KAIS00b] Kaiser, H.; Kersting, M.; Schian, H.-M.; Jacobs, A.; Kasprowski, D.: Der Stellenwert des EFL-Verfahrens nach Susan Isernhagen in der medizinischen und beruflichen Rehabilitation. In: Rehabilitation. 39. Jg., 2000, S. 297–306
- [KARH77] Karhu, O.; Kansi, P.; Kuorinka, I.: Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. In: Applied Ergonomics. 8. Jg., 1977, Nr. 4, S. 199–201
- [KILB94] Kilbom, Å.: Repetitive work of the upper extremity: Part II — The scientific basis (knowledge base) for the guide. In: International Journal of Industrial Ergonomics. 14. Jg., 1994, 1-2, S. 59–86
- [KÖNE12] Könemann, R.; Bosch, T.; Looze, M. de: Movement strategy and performance in a high-volume order picking workstation. In: Work (Reading, Mass.). 41 Suppl 1, 2012, S. 1311–1315
- [KUIP20] Kuipers, J. B.: Quaternions and Rotation Sequences : A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality, Princeton, NJ. Princeton University Press, 2020
- [LAUR92] Laurig, W.: Grundzüge der Ergonomie : Erkenntnisse und Prinzipien. 4. Aufl., Berlin u.a. Beuth, 1992
- [LEE15] Lee, S. H.; Yoon, C.; Chung, S. G.; Kim, H. C.; Kwak, Y.; Park, H.; Kim, K.: Measurement of Shoulder Range of Motion in Patients with Adhesive Capsulitis Using a Kinect. In: PLOS ONE. 10. Jg., 2015, Nr. 6, S. 1–12
- [LOTT12] Lotter, B.: Montage in der industriellen Produktion : Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. 2013, Berlin, Heidelberg. Springer, 2012
- [MARE20] Mareczek, J.: Grundlagen der Roboter-Manipulatoren – Band 1, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2020
- [MATH85] Mathiowetz, V.; Kashman, N.; Volland, G.; Weber, K.; Dowe, M.; Rogers, S.: Grip and Pinch Strength: Normative data for adults. In: Archives of physical medicine and rehabilitation. 66. Jg., 1985, S. 69–74
- [MCAT93] McAtamney, L.; Nigel Corlett, E.: RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. In: Applied Ergonomics. 24. Jg., 1993, Nr. 2, S. 91–99
- [MENA11] Menache, A.: Understanding motion capture for computer animation. 2nd ed., Burlington, MA. Morgan kaufmann, 2011

- [MENN11] Menna, F.; Remondino, F.; Battisti, R.; Nocerino, E.: Geometric investigation of a gaming active device. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 8085. Jg., 2011
- [MOZD13] Mozdzanowski, M.; Glatz, A.: Das Profilvergleichssystem IMBA als Instrument im betrieblichen Eingliederungsmanagement. In: B&G Bewegungstherapie und Gesundheitssport. 29. Jg., 2013, Nr. 02, S. 55–61
- [MÜHL12] Mühlstedt, J.: Entwicklung eines Modells dynamisch-muskulärer Arbeitsbeanspruchungen auf Basis digitaler Menschmodelle. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2012, Chemnitz. Universitätsverlag Chemnitz, 2012
- [MÜHL16a] Mühlstedt, J.: Digitale Menschmodelle. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 73–182
- [MÜHL16b] Mühlstedt, J.: Körperumrisschablonen und historische digitale Menschmodelle. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 41–71
- [NOVO98] Novotny, J. E.; Nichols, C. E.; Beynnon, B. D.: Normal kinematics of the unconstrained glenohumeral joint under coupled moment loads. In: Journal of Shoulder and Elbow Surgery. 7. Jg., 1998, Nr. 6, S. 629–639
- [OECD21] OECD: Demographic trends: Health at a Glance 2021: OECD Indicators. (Reihe: Health at a Glance). Paris: OECD Publishing, 2021
- [OHLE21] Ohle, C.: Ableitung von Maßnahmen zur ergonomischen Verbesserung von Montage- und Logistkarbeitsplätzen. Technische Universität Hamburg. Masterarbeit (Betreuer: Brosche, J.; Prüfer: Löd- ding, H.), Hamburg, 2021
- [OLIV06] Oliveri, M.: Functional Capacity Evaluation (FCE). In: Gobelet, C.; Franchignoni, F. (Hrsg.): Vocational Rehabilitation. Paris: Springer Paris, 2006, S. 69–93

- [PAUL18] Paulich, M.; Schepers, M.; Rudigkeit, N.; Bellusci, G.: Xsens MTw Awinda: Miniature Wireless Inertial-Magnetic Motion Tracker for Highly Accurate 3D Kinematic Applications, 2018
- [PETE19] Peters, M.; Quadrat, E.; Nolte, A.; Wolf, A.; Miehling, J.; Wartzack, S.; Leidholdt, W.; Bauer, S.; Fritzsche, L.; Wischniewski, S.: Biomechanical Digital Human Models: Chances and Challenges to Expand Ergonomic Evaluation. In: Human Systems Engineering and Design. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 885–890
- [PFOH18] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme : betriebswirtschaftliche Grundlagen. 9., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin. Springer Vieweg, 2018
- [PLAN17] Plantard, P.; Shum, H. P.; Le Pierres, A.-S.; Multon, F.: Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. In: Applied Ergonomics. 65. Jg., 2017, S. 562–569
- [PORT19] Porto, J. M.; Nakaishi, A. P. M.; Cangussu-Oliveira, L. M.; Freire Júnior, R. C.; Spilla, S. B.; Abreu, D. C. C. de: Relationship between grip strength and global muscle strength in community-dwelling older people. In: Archives of gerontology and geriatrics. 82. Jg., 2019, S. 273–278
- [POTV97] Potvin, J. R.: Use of NIOSH equation inputs to calculate lumbosacral compression forces. In: Ergonomics. 40. Jg., 1997, Nr. 7, S. 691–707
- [RICH13] Richard, H. A.: Biomechanik : Grundlagen und Anwendungen auf den menschlichen Bewegungsapparat, Wiesbaden. Springer Vieweg, 2013
- [ROBE09] Robertson, M.; Amick, B. C.; DeRango, K.; Rooney, T.; Bazzani, L.; Harrist, R.; Moore, A.: The effects of an office ergonomics training and chair intervention on worker knowledge, behavior and musculoskeletal risk. In: Applied Ergonomics. 40. Jg., 2009, Nr. 1, S. 124–135
- [ROBE17] Robert-Lachaine, X.; Mecheri, H.; Larue, C.; Plamondon, A.: Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis. In: Medical & biological engineering & computing. 55. Jg., 2017, Nr. 4, S. 609–619

- [ROHM83] Rohmert, W.: Formen menschlicher Arbeit. In: Lehmann, G.; Rohmert, W.; Rutenfranz, J.; Haider, E. (Hrsg.): *Praktische Arbeitsphysiologie*. 3., neubearbeitete Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 1983, S. 5–29
- [ROHM84] Rohmert, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften*, 1984, 38 (10 NF), S. 193–200
- [SALI15] Salis-Soglio, G. von: *Die Neutral-0-Methode: Mit Längen- und Umfangsmessung*, Berlin. Springer, 2015
- [SCHA13] Schaub, K.; Caragnano, G.; Britzke, B.; Bruder, R.: The European Assembly Worksheet. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 14. Jg., 2013, Nr. 6, S. 616–639
- [SCHE18] Schepers, M.; Giuberti, M.; Bellusci, G.: *Xsens MVN: Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing*, 2018
- [SCHL18] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: *Arbeitswissenschaft*. 4. Auflage, Berlin. Springer Vieweg, 2018
- [SCHM14] Schmitz, A.; Ye, M.; Shapiro, R.; Yang, R.; Noehren, B.: Accuracy and repeatability of joint angles measured using a single camera markerless motion capture system. In: *Journal of Biomechanics*. 47. Jg., 2014, Nr. 2, S. 587–591
- [SCHM22] Schmauder, M.: *Ergonomie : Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. 2., überarbeitete Auflage, München. Hanser, 2022
- [SCHÜ18] Schünke, M.; Schulte, E.; Schumacher, U.; Voll, M.; Wesker, K. H.: *PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. 5., vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart, New York. Georg Thieme Verlag, 2018
- [SCHU22] Schumann, M.; Marschall, J.; Hildebrandt, Susanne; Nolting, Hans-Dieter: *Gesundheitsreport 2022, Analyse der Arbeitsunfähigkeitsdaten. Risiko Psyche: Wie Depressionen, Ängste und Stress das Herz belasten*, Hamburg, April 2022
- [SPIT16] Spitzhirm, M.; Bullinger-Hoffmann, A. C.: Eine Anforderungsermittlung zu digitalen Menschmodellen als Instrument zur ergonomischen Arbeitsprozessgestaltung, Anforderungen und Bedarf aus Praxissicht. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.):

- Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 229–246
- [SPOR23] Saehan Handdynamometer "SH5001". URL: <https://www.sportthieme.de/Therapie/Bewegen-Mobilisieren/Messinstrumente/art=2775803> [Stand: 24.02.2023]
- [STEI12] Steinberg, U.; Liebers, F.; Klußmann, A.; Gebhardt, H.; Rieger, M. A.; Behrendet, S.; Latza, U.: Leitmerkalmethode Manuelle Arbeitsprozesse 2011, Bericht über die Erprobung, Validierung und Revision. Forschung Projekt F2195, Dortmund, Berlin, Dresden. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2012
- [STEI16] Steiber, N.: Strong or Weak Handgrip? Normative Reference Values for the German Population across the Life Course Stratified by Sex, Age, and Body Height. In: PLOS ONE. 11. Jg., 2016, Nr. 10, e0163917
- [STER16] Stereoarts: SAFullBodyIK, FullBodyIK for Unity, 2016
- [STOK03] Stokdijk, M.; Eilers, P. H. C.; Nagels, J.; Rozing, P. M.: External rotation in the glenohumeral joint during elevation of the arm. In: Clinical biomechanics (Bristol, Avon). 18. Jg., 2003, Nr. 4, S. 296–302
- [STUC21] Stuckenberg, M.: Design eines Versuchsaufbaus zur Überprüfung von Bewegungstransformationen für Montage- und Logistikprozesse. Technische Universität Hamburg. Bachelorarbeit (Betreuer: Brosche, J.; Prüfer: Lödding, H.), Hamburg, 2021
- [TANN13] Tannenhauer, J. (Hrsg.): Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen bei manuellen Arbeitsprozessen (Reihe: LASI-Veröffentlichungen, Bd. 57), Dresden. Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI), 2013
- [TICH78] Tichauer, E. R.: The biomechanical basis of ergonomics, New York. Wiley, 1978
- [UNRE23] Animation Retargeting. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.26/en-US/AnimatingObjects/SkeletalMeshAnimation/AnimationRetargeting/> [Stand: 09.01.2023]

- [VDI2860] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 2860 (1990). Montage- und Handhabungstechnik, Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. VDI-Verlag, Düsseldorf (1990)
- [VDI4499] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 4499 Blatt 4 (2015). Digitale Fabrik, Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2015)
- [VIVE22] ViveLab Ergo. URL: <https://www.vivelab.cloud/> [Stand: 21.09.2022]
- [WAKU09] Wakula, J.; Berg, K.; Schaub, K.; Bruder, R.; Glitsch, U.; Ellegast, R. P.: Der montagespezifische Kraftatlas, BGIA-Report 3/2009, Berlin, 2009
- [WANG91] Wang, L.-C.; Chen, C. C.: A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation. 7. Jg., 1991, Nr. 4, S. 489–499
- [WARN75] Warnecke, H.-J.: Montagetechnik : Schwerpunkt der Rationalisierung, Mainz. Krausskopf, 1975
- [WEBE20] Weber, B.; Seidel, D.; Brütting, M.; Ditchen, D.; Eul, M.; Glitsch, U.; Heinrich, K.; Hermanns-Truxius, I.; Hoehne-Hückstädt, U.; Lietz, R.; Post, M.; Barrero, L.; Ellegast, R.: Weiterentwicklung und Evaluierung von Ansätzen zur Gefährdungsanalyse bei physischen Belastungen für die Methodenebene Messtechnische Analyse im Feld. In: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Report 3/2020. MEGAPHYS: Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz, 2020, S. 269–410
- [WIEN19] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 9., vollständig überarbeitete Auflage, München. Hanser, 2019
- [WIND10] Wind, A. E.; Takken, T.; Helders, P. J. M.; Engelbert, R. H. H.: Is grip strength a predictor for total muscle strength in healthy children, adolescents, and young adults? In: European journal of pediatrics. 169. Jg., 2010, Nr. 3, S. 281–287
- [WINT09] Winter, D. A.: Biomechanics and motor control of human movement. 4th ed., Hoboken, N.J. Wiley, 2009

- [WU05] Wu, G.; van der Helm, F. C. T.; Veeger, H. E. J. D.; Makhsous, M.; van Roy, P.; Anglin, C.; Nagels, J.; Karduna, A. R.; McQuade, K.; Wang, X.; Werner, F. W.; Buchholz, B.: ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion--Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. In: Journal of Biomechanics. 38. Jg., 2005, Nr. 5, S. 981–992
- [XSEN19] XSens: Xsens MVN User Manual, User Guide Xsens MVN, MVN Link, MVN Awinda [Stand: 21.09.2022]
- [XSEN22] MVN Analyze. URL: <https://www.xsens.com/products/mvn-analyze> [Stand: 20.09.2022]
- [ZULK17] Zulkarnain, R. F.; Kim, G.-Y.; Adikrishna, A.; Hong, H. P.; Kim, Y. J.; Jeon, I.-H.: Digital data acquisition of shoulder range of motion and arm motion smoothness using Kinect v2. In: Journal of Shoulder and Elbow Surgery. 26. Jg., 2017, Nr. 5, S. 895–901

## Anhang A

Tabelle A-1: Maßnahmenkatalog für Belastungen der HWS in Anlehnung an [OHLE21, S. 104]

Halswirbelsäule		
Ziele: Reduktion von Gelenkendstellungen/Anstreben der Neutral-Null-Stellung		
Belastungsart	TOP-Prinzip	Maßnahmen
<b>Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit</b>  (Fokus: Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Flexion/Extension verringern)
		2. höhenverstellbare Informationsbereitstellung (Flexion/Extension vermeiden)
		3. Anordnung der Anzeigen, Bildschirmen etc. anpassen
		4. Sichtbereiche des Menschen berücksichtigen
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
		...
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Schulung über ideale Einstellung von Anzeigen, Bildschirmen etc.
		2. Rückwärtsfahrten mit Flurförderfahrzeugen vermeidbar? (Rotation verringern)
...		
<b>Statische Haltung</b>  (Fokus: Dauer ergonomisch ungünstiger Haltungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeitshöhe anpassen (Flexion und Extension vermeiden)
		2. Anordnung der Informationsquellen anpassen
		3. Nur notwendige Informationen bereitstellen
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
		...
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Schulung über ideale Einstellung von Anzeigen, Bildschirmen etc.
		2. Rückwärtsfahrten mit Flurförderfahrzeugen vermeidbar? (Rotation verringern)
		3. Regelmäßige Haltungsänderungen fördern
...		

**Tabelle A-2: Maßnahmenkatalog für Belastungen der BWS/LWS in Anlehnung an [OHLE21, S. 109-110]**

<b>Brust- und Lendenwirbelsäule</b>		
<b>Ziele: Vermeidung von Arbeiten mit Rumpfbeugehaltung/Vermeidung von häufiger und intensiver Rotation und Lateralflexion/Minimierung der äußeren Lasteinwirkung (L5/S1-Moment und Wirbelsäulenkompressionskraft)</b>		
<b>Belastungsart</b>	<b>TOP-Prinzip</b>	<b>Maßnahmen</b>
<b>Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit</b>  (Fokus: Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
		2. Hebehilfe zur Verfügung stellen (z. B. Hubwagen, Deckenkran, ...)
		3. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		4. Frontale Anordnung der Arbeits- und Greifbereiche (Rotation vermeiden)
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (auch bei indiv. Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
	...	
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Rotation des Oberkörpers vermeiden
		2. Aus den Beinen heben
...		
<b>Statische Haltung</b>  (Fokus: Dauer ergonomisch ungünstiger Haltungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Oberkörper-/Armstützen installieren
		2. Arbeitshöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
		3. Bildschirme, Anleitungen etc. auf Augenhöhe anbringen
		4. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (auch bei indiv. Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
	...	
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Hilfsmittel nutzen
		2. Regelmäßige Haltungsänderungen fördern
...		
<b>Lastenhandhabung</b>  (Fokus: Intensität der Lastwirkung reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
		2. Hebehilfe zur Verfügung stellen (z. B. Hubwagen, Deckenkran, ...)
		3. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		4. Handwagen für längere Transportwege zur Verfügung stellen
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (auch bei indiv. Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
	...	
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Unterweisung der Mitarbeiter (z. B. aus den Beinen heben, Last nah am Körper bewegen, Hilfsmittel nutzen, ...)
		2. Sport und Training fördern
...		

**Tabelle A-3: Maßnahmenkatalog für Belastungen der Schultern in Anlehnung an [OHLE21, S. 105-106]**

Schulter		
Ziele: Reduktion von Gelenkendstellungen/ Anstreben der Neutral-Null-Stellung/ Vermeidung von Arbeiten über Schulterniveau/ Minimierung der Lastwirkung		
Belastungsart	TOP-Prinzip	Maßnahmen
<b>Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit</b>  (Fokus: Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Flexion & Abduktion verringern)
		2. Höhe der Werkzeugbereitstellung verringern
		3. Arbeitstritt zur Verfügung stellen
		4. Entfernung von Interaktionspunkten verringern
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
		...
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Ergonomie-Schulung
		2. Aufklärung über indiv. Fähigkeitssteigerung (bei Einschränkung)
<b>Statische Haltung</b>  (Fokus: Dauer ergonomisch ungünstiger Haltungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Oberkörper-/Armstützen installieren
		2. Arbeitshöhe anpassen (Verbeugung vermeiden)
		3. Bildschirme, Anleitungen etc. auf Augenhöhe anbringen
		4. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
		...
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Hilfsmittel nutzen
		2. Regelmäßige Haltungsänderungen fördern
<b>Lastenhandhabung</b>  (Fokus: Intensität der Lastwirkung reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Arbeits-/Materialhöhe anpassen (Vorbeugung vermeiden)
		2. Hebehilfe zur Verfügung stellen (z. B. Hubwagen, Deckenkran, ...)
		3. Distanz zu Interaktionspunkten verringern (z. B. Hub- Kippgeräte)
		4. Handwagen für längere Transportwege zur Verfügung stellen
		5. Werkzeuggewicht reduzieren
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
		5. Losgröße pro Behälter verringern
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Unterweisung der Mitarbeiter (z. B. Last nah am Körper bewegen, Hilfsmittel nutzen, ...)
		2. Sport und Training fördern
		...

**Tabelle A-4: Maßnahmenkatalog für Belastungen der Ellenbogen in Anlehnung an [OHLE21, S. 107]**

Ellenbogen		
Ziele: Reduktion von Gelenkendstellungen und statischen Haltungen in ergonomisch ungünstigen Winkelbereichen		
Belastungsart	TOP-Prinzip	Maßnahmen
<b>Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit</b>  (Fokus: Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	<b>T</b> (Technisch)	1. Arbeitshöhe anpassen (Flexion verringern)
		2. Materialbereitstellung in Greifräumen
		...
	<b>O</b> (Organisatorisch)	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
	...	
	<b>P</b> (Personenbezogen)	1. Ergonomie-Schulung
2. Gesundheitsaufklärung		
...		
<b>Statische Haltung</b>  (Fokus: Dauer ergonomisch ungünstiger Haltungen reduzieren)	<b>T</b> (Technisch)	1. Arbeitshöhe anpassen (Flexion verringern)
		2. Materialbereitstellung in Greifräumen
		3. Armstützen installieren
	...	
	<b>O</b> (Organisatorisch)	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
	...	
<b>P</b> (Personenbezogen)	1. Ergonomie-Schulung	
	2. Regelmäßige Haltungsänderungen fördern	
...		

**Tabelle A-5: Maßnahmenkatalog für Belastungen der Handgelenke in Anlehnung an [OHLE21, S. 108]**

Handgelenk		
Ziele: Reduktion von Gelenkendstellungen und statischen Haltungen in ergonomisch ungünstigen Winkelbereichen / Anstreben der Neutral-Null-Stellung		
Belastungsart	TOP-Prinzip	Maßnahmen
<b>Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit</b>  (Fokus: Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Behälter der Materialbereitstellung zum MA neigen (Palmarflexion vermeiden)
		2. Orientierung der Werkstücke optimieren (z. B. Drehtisch)
		3. Werkzeuge mit ergonomischem Griff einsetzen
		4. Flache Materialbehälter verwenden
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
		...
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Ergonomie-Schulung
		2. Gesundheitsaufklärung
<b>Statische Haltung</b>  (Fokus: Dauer ergonomisch ungünstiger Haltungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Behälter der Materialbereitstellung zum MA neigen (Palmarflexion vermeiden)
		2. Orientierung der Werkstücke optimieren (z. B. Drehtisch)
		3. Werkzeuge mit ergonomischem Griff einsetzen
		4. Flache Materialbehälter verwenden
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
		...
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Hilfsmittel nutzen
		2. Regelmäßige Haltungsänderungen fördern
		...

**Tabelle A-6: Maßnahmenkatalog für Belastungen der Knie in Anlehnung an [OHLE21, S. 111]**

Knie		
Ziele: Vermeidung von Arbeiten in Kniebeuge und kniebelastenden Haltungen (Knien, Hocken, Fersensitz)		
Belastungsart	TOP-Prinzip	Maßnahmen
<b>Beanspruchung der Gelenkbeweglichkeit</b>  (Fokus: Intensität und Häufigkeit von Bewegungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Materialaufnahmehöhe anpassen (Tiefes Heben vermeiden)
		2. Hubtisch einsetzen (Tiefes Heben vermeiden)
		3. Hebehilfe bereitstellen
		4. Knierollwagen mit Sitz/ Oberkörperstütze bereitstellen
		5. Sitzmöglichkeit bereitstellen
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
	...	
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Mitarbeiterunterweisung zur Nutzung von Hilfsmitteln
2. Gesundheitsaufklärung		
...		
<b>Statische Haltung</b>  (Fokus: Dauer ergonomisch ungünstiger Haltungen reduzieren)	<b>T (Technisch)</b>	1. Materialaufnahmehöhe anpassen (Tiefes Heben vermeiden)
		2. Hubtisch einsetzen (Tiefes Heben vermeiden)
		3. Hebehilfe bereitstellen
		4. Knierollwagen mit Sitz/ Oberkörperstütze bereitstellen
		5. Sitzmöglichkeit bereitstellen
		...
	<b>O (Organisatorisch)</b>	1. Aktivitäts- und Entlastungsabschnitte ändern (Reihenfolge, Länge, Anzahl)
		2. MA-Auswahl und -zuweisung anpassen (z. B. bei Einschränkungen)
		3. Belastungsorientierte MA-Rotation einführen
		4. Zusätzliche Pausen im Arbeitsablauf
	...	
	<b>P (Personenbezogen)</b>	1. Mitarbeiterunterweisung zur Nutzung von Hilfsmitteln
2. Regelmäßige Haltungsänderungen fördern		
...		

## Anhang B

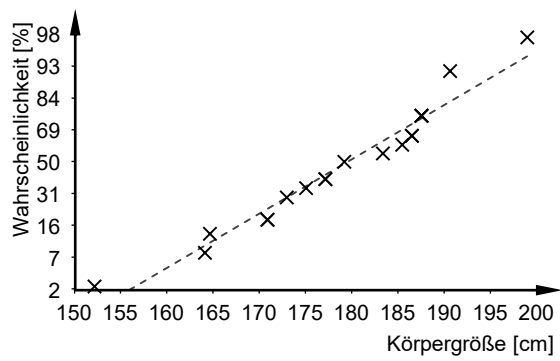


Abbildung B-1: Wahrscheinlichkeitsnetz der Körpergrößen in Anlehnung an [STUC21, S. 50]

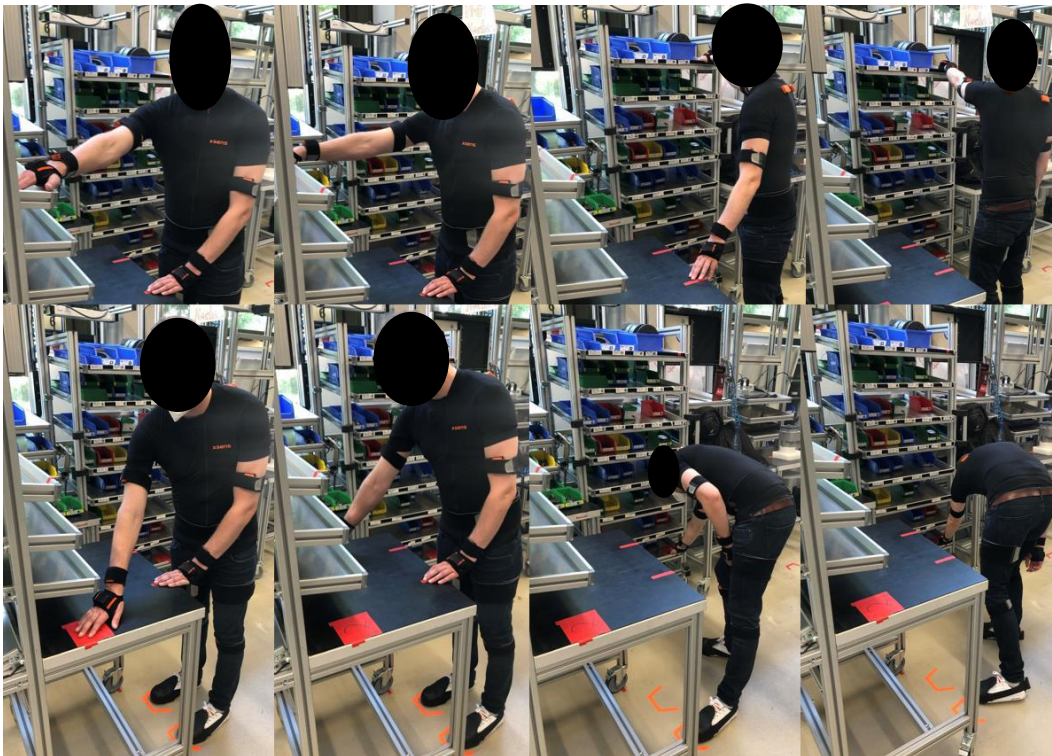


Abbildung B-2: Bewegung „Greifen“ in Anlehnung an [STUC21, S. 45]



**Abbildung B-3: Bewegung „Werkzeugbedienung“ in Anlehnung an [STUC21, S. 44]**



**Abbildung B-4: Bewegung „Heben und Einlagern“ in Anlehnung an [STUC21, S. 46]**



**Abbildung B-5: Bewegung „Seitliches Heben und Fügen“ in Anlehnung an [STUC21, S. 47]**



Abbildung B-6: Bewegung „Maschinenbedienung (manuell)“ in Anlehnung an [STUC21, S. 48]



Abbildung B-7: Bewegung „Maschinenbedienung“ (automatisch) in Anlehnung an [STUC21, S. 48]

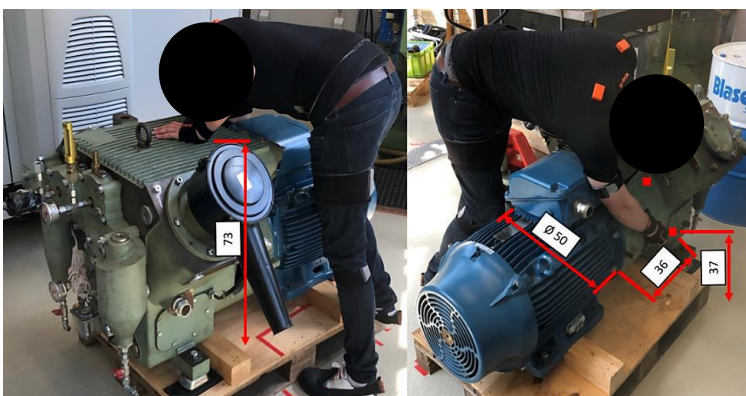


Abbildung B-8: Bewegung „Körperzwangshaltung“ in Anlehnung an [STUC21, S. 49]

**Tabelle B-1: Beispielhafte Messdaten der Aufnahme von Testperson 2 beim Fügen (Bewegung: Einhändiges Heben und Fügen) in Anlehnung an [STUC21].**

Haltung zum Zeitpunkt [s]	HWS Extension [°]	HWS Rotation (L) [°]	HWS Lateral-Flexion (L) [°]	Schulterflexion (L) [°]	Schulterflexion (R) [°]
165,17	5,39	9,83	5,10	104,64	107,76
176,33	9,69	15,84	7,57	106,83	110,79
188,50	8,88	13,52	6,48	104,91	107,87
200,17	7,22	14,81	5,27	105,33	107,60
212,58	11,28	8,13	3,95	103,05	107,45
225,42	5,31	9,10	4,34	100,13	104,37
<b>Mittelwert</b>	7,96	11,87	5,45	104,15	107,64
<b>Standardabweichung</b>	2,41	3,25	1,36	2,32	2,03

**Tabelle B-2: Beispielhafte aggregierte Daten von Testperson 2; Flexionswinkel der linken Schulter beim Fügen (Bewegung: Einhändiges Heben und Fügen) in Anlehnung an [STUC21]. Testperson 6 und Testperson 19 wurden aufgrund von verrutschten Sensoren bei der Aufnahme von der gesamten Versuchsauswertung ausgeschlossen.**

transformierter Bewegungsablauf von:	Mittelwerte [°]	Standardabweichung [°]	Abweichung zu realem Mittelwert [°]
Testperson 1	77,68	2,67	26,47
Testperson 2	99,93	2,30	4,22
Testperson 3	49,69	20,37	54,46
Testperson 4	102,38	2,65	1,77
Testperson 5	114,66	5,20	10,51
Testperson 7	91,90	3,53	12,25
Testperson 8	96,76	2,93	7,39
Testperson 9	86,15	30,86	18,00
Testperson 10	114,35	2,15	10,21
Testperson 11	99,29	2,27	4,86
Testperson 12	100,59	4,27	3,56
Testperson 14	109,14	2,43	4,99
Testperson 15	102,80	4,68	1,35
Testperson 16	122,09	1,80	17,94
Testperson 17	74,33	3,04	29,82
Testperson 18	109,51	3,97	5,36
Testperson 20	94,60	6,72	9,55
Testperson 21	105,56	2,32	1,42
<b>Gesamtmittelwert</b>	92,18	5,48	11,80
<b>Standardabweichung</b>	27,84	7,45	13,30

## Anhang C

**Tabelle C-1: Aufnahmen im Montageunternehmen**

Arbeitsplatz	Aufnahme von Mitarbeiter	Dauer	Anzahl allgemeiner Maßnahmen	Anzahl individueller Maßnahmen
1	1	41 min 6 s	Technisch: 5 Organisatorisch: 1 Personenbezogen: 1	Technisch: 1 Organisatorisch: 0 Personenbezogen: 0
	2	41 min 11 s		
2	3	33 min 01 s	Technisch: 2 Organisatorisch: 1 Personenbezogen: 0	Technisch: 0 Organisatorisch: 0 Personenbezogen: 0
3	4	81 min 7 s	Technisch: 5 Organisatorisch: 0 Personenbezogen: 4	Technisch: 0 Organisatorisch: 2 Personenbezogen: 0
4	5	91 min 29 s	Technisch: 5 Organisatorisch: 2 Personenbezogen: 2	Technisch: 0 Organisatorisch: 0 Personenbezogen: 0

**Tabelle C-2: Aufnahmen im Logistikunternehmen**

Arbeitsplatz	Aufnahme von Mitarbeiter	Dauer	Anzahl allgemeiner Maßnahmen	Anzahl individueller Maßnahmen
1	1 (Aufnahme 1)	12 min 25 s	Technisch: 3 Organisatorisch: 0 Personenbezogen: 2	Technisch: 1 Organisatorisch: 0 Personenbezogen: 1
	1 (Aufnahme 2)	17 min 52 s		
	2	4 min 50 s		
2	2	5 min 48 s	Technisch: 3 Organisatorisch: 1 Personenbezogen: 1	Technisch: 0 Organisatorisch: 0 Personenbezogen: 0
	3	17 min 41 s		

**Band 1**

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

**Band 2**

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

**Band 3**

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

**Band 4**

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

**Band 5**

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategiejumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

**Band 6**

Davids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

**Band 7**

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

**Band 8**

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

**Band 9**

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

**Band 10**

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2010.

**Band 11**

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

**Band 12**

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitoptimierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

**Band 13**

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

**Band 14**

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

**Band 15**

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

**Band 16**

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

**Band 17**

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

**Band 18**

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

**Band 19**

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

**Band 20**

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

**Band 21**

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

**Band 22**

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

**Band 23**

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

**Band 24**

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

**Band 25**

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

**Band 26**

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

**Band 27**

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

**Band 28**

Griefahn, Dominik: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

**Band 29**

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Offline-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

**Band 30**

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

**Band 31**

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

**Band 32**

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

**Band 33**

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017

**Band 34**

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

**Band 35**

Halata, Philipp S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

**Band 36**

Brüggemann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

**Band 37**

Benter, Martin: Analyse von Bewegungsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.

**Band 38**

Koch, Christoph: Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger, 2018.

**Band 39**

Cordes, Marcel: Modellierung von Bahngenauigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen, 2019.

**Band 40**

Piontek, Andreas: Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 2020.

**Band 41**

Grabner, Constantin: Methodengestütztes Produktivitätsmanagement. Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens, 2020.

**Band 42**

Glöckner, Robert: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen, 2020.

**Band 43**

Schröder, Henrik: Kompetenzentwicklung in der Montage mit Hilfe virtueller Technologien, 2020.

**Band 44**

Engehausen, Friederike: Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien, 2021.

**Band 45**

Sikorra, Jan Niklas: Frühzeitige Aufwands- und Termineinschätzung der schiffbaulichen Unikatproduktion, 2021.

**Band 46**

Haux, Moritz A.: Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion, 2021.

**Band 47**

von Wenserski, Robert: Helixfräsen und Bohren von laseradditiv gefertigten Bauteilen aus Titan für Luftfahrtanwendungen, 2021.

**Band 48**

Meluzov, Nikolaj: Informationsmanagement für ein digitales Instandhaltungsassistenzsystem, 2022.

**Band 49**

Rost, Jan Robert: Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion, 2023.

**Band 50**

Steenwerth, Philipp: Analyse und Optimierung von Suchvorgängen in der industriellen Produktion, 2023.

**Band 51**

Brosche, Justus: Nutzung von Motion-Capture-Technologien zur individuellen Ergonomieanalyse in der Produktion, 2023.