

Schlussbericht vom 25.02.2025

zum IGF-Vorhaben Nr. 01 | F22422N

Thema

Automatisierte kamerabasierte ergonomische Evaluation von Arbeitsplätzen

Berichtszeitraum

01.05.2022-25.02.2025

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V.

Schlachte 31

28195 Bremen

Forschungseinrichtung(en)

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Hollerithallee 6

30419 Hannover

Institut für Informationsverarbeitung (tnt)

Appelstraße 9A

30167 Hannover

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Anforderungsaufnahme der Ergonomiebewertungsmethode.....	4
1.2	Arbeitspaket 2: Erstellung des Datensatzes.....	6
1.3	Arbeitspaket 3: Konzeption der Ergonomiebewertungsmethode.....	9
1.4	Arbeitspaket 4: Softwaretechnische Umsetzung der Ergonomiebewertungsmethode	13
1.5	Arbeitspaket 5: Evaluierung und Praxistest des Ergonomiebewertungssystems	19
1.6	Arbeitspaket 6: Dokumentation und Ergebnistransfer	26
2	Verwendung der Zuwendung	28
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	29
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	29
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	31
6	Durchgeführte Transfermaßnahmen	31
7	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	32
8	Literaturverzeichnis	32

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „AkEvAp“ hatte das Ziel, eine automatisierte, kamerabasierte ergonomische Bewertung von Arbeitsplätzen für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zu entwickeln. Die Motivation lag darin, ergonomische Fehlhaltungen und Belastungen zu reduzieren, die in KMU häufig zu krankheitsbedingten Ausfällen führen. Herausforderungen wie hohe Kosten und Komplexität existierender Systeme sowie die Notwendigkeit objektiver und reproduzierbarer Bewertungen machten eine innovative Lösung notwendig.

Im Projekt wurde eine Ergonomiebewertungsmethode (EBM) automatisiert, die auf bewährten Bewertungsansätzen sowie modernen Technologien basiert. Hierbei kamen die Leitmerkmalermethode (LMM) und die NIOSH-Hebegleichung (NIOSH) zum Einsatz, um eine umfassende Analyse der ergonomischen Gegebenheiten zu ermöglichen. Die LMM ermöglicht, langfristige Belastungen systematisch zu erfassen, und unterstützt somit nachhaltige Verbesserungen der Arbeitsplatzgestaltung. Die NIOSH-Hebegleichung ergänzt diesen Ansatz, indem sie eine detaillierte Analyse kurzfristiger Belastungen und Hebevorgänge ermöglicht, um Überbeanspruchungen frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden. Diese beiden Methoden ergänzen sich ideal und adressieren sowohl die strategische als auch die operative Ebene der Ergonomiebewertung, indem die LMM für die langfristige Planung und Gestaltung ergonomischer Arbeitsplätze genutzt wird, während die NIOSH-Hebegleichung kurzfristige Belastungen und akute Risiken direkt bewertet.

Zur Schaffung einer Datengrundlage wurden realitätsnahe Modellumgebungen aufgebaut, die mithilfe eines Kamerasystems Bewegungen der Mitarbeitenden aufzeichneten. Die erfassten Daten können vom entwickelten System direkt ausgewertet werden, wodurch Körperhaltungen und Bewegungsabläufe präzise erfasst und analysiert werden können. Zusätzlich erkennt das System, wann ein Tragevorgang beginnt und endet, also ob ein Objekt in der Hand gehalten wird oder nicht. Die ausgewerteten Daten dienen als Grundlage für die Anwendung der LMM und der NIOSH-Hebegleichung.

Die Ergebnisse des Projekts umfassen:

- eine Skelettierungsmethode zur Erkennung von Posen und Belastungen
- eine Bewertungsmethodik basierend auf industriellen Standards
- einen Software-Demonstrator mit benutzerfreundlicher Oberfläche für KMU

Das Projekt zeigt, dass durch die entwickelten Methoden ergonomische Risiken effektiv erkannt und reduziert werden können. Dies unterstützt KMU sowohl bei der Verbesserung der Mitarbeitergesundheit als auch bei der Steigerung der Produktivität. Die Ergebnisse des Projekts sind öffentlich zugänglich und fördern somit eine breite Anwendung sowie Weiterentwicklung, um langfristig eine gesunde und effiziente Arbeitsumgebung in KMU zu schaffen.

Auf den folgenden Seiten werden die durchgeführten Arbeitsschritte und die erzielten Ergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen (AP) dargelegt. Die Ergebnisse können auf der Website <https://akevap.iph-hannover.de> eingesehen werden. Der Software-Code ist auf GitHub veröffentlicht (https://github.com/iph-hannover/AkEvAp_Demo).

1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsaufnahme der Ergonomiebewertungsmethode

Ziel: Das Ziel des AP 1 ist die Definition der Anforderungen an die zu entwickelnde EBM. Parallel dazu soll das zugrundeliegende Problem analysiert und ein methodisches Vorgehen als Lösungskonzept entwickelt werden.

AP 1.1: Definition und Anforderungsaufnahme an das Ergonomiebewertungssystem (IPH)

Ziel: Ziel des AP 1.1 ist die Definition von Anforderungen an die zu entwickelnde EBM.

Durchgeführte Arbeiten:

Zu Beginn des Forschungsprojekts wurde der Kontakt zu relevanten Akteuren aus unterschiedlichen Verantwortungsbereichen im Kontext der Ergonomiebewertung hergestellt. Diese umfassen unter anderem Vertreter mehrerer Krankenkassen, einen Sportwissenschaftler sowie Institutionen wie die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) und die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). In Zusammenarbeit mit einem Sportwissenschaftler, welcher ein Experte für Ergonomie am Arbeitsplatz ist, wurde ein Workshop über Grundlagen zur Konzeption eines möglichen EBM durchgeführt. Zusätzlich wurden die Anforderungen im Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert, sodass spezifische Anforderungen an das EBM formuliert werden konnten, die sowohl ergonomische Aspekte als auch anwendungsbezogene Anforderungen an Arbeitsplätze adressieren. Diese Ergebnisse bilden eine fundierte Grundlage für die weitere Entwicklung des Systems. Tabelle 1 listet die wichtigsten Anforderungen an das Projektergebnis auf.

Tabelle 1: Anforderungen an die EBM

Anforderung	Ausprägung / Beschreibung
Quasi-Echtzeitfähigkeit*	– Das EBS soll in Quasi-Echtzeit eine Bewertung der Körperhaltung vornehmen und den Anwender auf falsche Belastungen hinweisen.
Langzeitfähigkeit	– Das EBS soll über einen Arbeitstag/eine Arbeitswoche Daten sammeln und dem Mitarbeiter beim langfristigen ergonomischen Arbeiten unterstützen.
Datenschutzkonformität	– Das EBS soll Datenschutzkonform funktionieren, sodass keine Unberechtigten auf die Daten der Mitarbeiter zugreifen können, nur diese selbst.
Nutzen einer anerkannten Ergonomiebewertungsmethode	– Diese Anforderung stellt sicher, dass die Ergebnisse des Projekts auf wissenschaftlich fundierten und praxiserprobten Grundlagen basieren, wodurch sowohl die Akzeptanz als auch die Anwendbarkeit des Systems in realen Arbeitsumgebungen erhöht werden.
Geringe Kosten bei Endprodukt	– Bei der Entwicklung des Systems wird darauf geachtet, dass Komponenten verwendet werden, die in Summe ein günstiges Produkt gestalten. – Beispielsweise stehen in diesem Fall die Verwendung von Open-Source-Software oder eines mit der benötigten Hardware mitgelieferten Software-Development-Kit (SDK) im Fokus.

Universalität und Einsatznähe sowie Portabilität und Anwendbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Das Einsatzspektrum soll möglichst weit gewählt werden. – Abdecken von „Person zu Ware“ und „Ware zu Person“ Kommissionierarbeitsplätzen.
Benutzerorientierte Bedienbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Der Benutzer soll durch eine einfache Einrichtung des Systems und einer intuitiven Benutzeroberfläche keinem Einarbeitungsaufwand unterliegen.

*Quasi-Echtzeit bezeichnet hier die Verarbeitung oder Übertragung von Daten, Ereignissen oder Informationen mit einer geringen, aber nicht vollständig vernachlässigbaren Verzögerung. Im Gegensatz zu echter Echtzeit, bei der die Verarbeitung ohne wahrnehmbare Verzögerung erfolgt, handelt es sich bei quasi-Echtzeit um eine nahezu sofortige Reaktion, die eine kurze Latenz aufweist, welche jedoch keine negative Auswirkung auf die Nutzung des Systems beinhaltet.

Während der Projektlaufzeit wurden die Zwischenergebnisse und entstandenen Herausforderungen kontinuierlich mit dem Projektbegleitenden Ausschuss abgesprochen und mit den Anforderungen verglichen. Dieses hatte zur Folge, dass Vorgehensweisen im Projektverlauf angepasst wurden, im Einklang mit den Anforderungen aus AP 1 und der Zustimmung des Projektbegleitenden Ausschusses.

Ergebnis:

- Definierte Anforderungen an die EBM

AP 1.2 Untersuchung und Klassifizierung des Problems (TNT)

Ziel: Das Ziel dieses AP besteht darin, den methodischen und technischen Rahmen für die in AP 2 vorgesehene Datenaufnahme zu definieren und sicherzustellen, dass die aufgenommenen Anforderungen in der Umsetzung berücksichtigt werden.

Durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde der methodische und technische Rahmen für die in AP 2 folgende Datenaufnahme definiert und auf Basis der aufgenommenen Anforderungen konkretisiert. Zwei Ansätze wurden evaluiert: Ein Multiview-Kamerasystem zur präzisen Erfassung von 3D-Gelenkkordinaten, das aus 2D-Pose-Detektionen ohne markerbasiertes Motion-Capturing generiert wird, sowie ein mobiler, monokularer Ansatz mit einem Endgerät, das sowohl eine Kamera als auch einen Tiefensensor nutzt. Letzteres bietet ein portables und praxistaugliches Setup, das direkt eingesetzt werden kann und durch die Nutzung individualisierbarer Geräte den Datenschutz vereinfacht. Abbildung 1 zeigt ein Datenflussdiagramm zur 3D-Pose-schätzung für die Verwendung eines Multiview-Kamerasystems und einem monokularen Ansatz.

Für die Kameras wurde eine Auflösung von mindestens 1920x1080 bei 30 FPS definiert, um eine Quasi-Echtzeitfähigkeit sicherzustellen. Zudem wurde ein standardisiertes Skelettmodell mit 15 Gelenkpunkten definiert, basierend auf der Hardware und dem Software-Development-Kit (SDK) von Apples iPhone. Ergänzend wurde der gesamte Datenverlauf von der Aufnahme über die Verarbeitung bis zur Speicherung der Bewegungsdaten geplant, um eine reibungslose Integration in nachfolgende Analyseprozesse sicherzustellen. Da im Verlauf des Projekts nach Rücksprache mit dem PA der Fokus auf eine bewährte Bewertungsmetrik gesetzt wurde, welche die Dynamik nicht explizit berücksichtigt, wurden Gedanken zur Aufzeichnung von Bodenreaktionskräften durch Kraftmessplatten verworfen.

Nach der Evaluierung der beiden Ansätze wurde der mobile Ansatz mit einem einzelnen Endgerät gewählt. Die Entscheidung fiel aus mehreren Gründen zugunsten dieser Lösung: Erstens ermöglicht der mobile Ansatz ein flexibles und kosteneffizientes Setup, das keine aufwendige Installation eines Multiview-Kamerasystems erfordert. Zudem beeinflusst eine markerbasierte Erfassung der 3D-Bewegung die Videodaten visuell, welches die auf ihnen basierende Algorithmen beeinträchtigen kann. Zweitens bietet er eine hohe Portabilität, wodurch die Bewegungsdatenerfassung an unterschiedlichen Standorten problemlos durchführbar ist. Drittens erlaubt die Nutzung individueller Geräte eine einfache Gewährleistung des Datenschutzes, da die Daten lokal auf dem jeweiligen Endgerät verarbeitet werden können. Schließlich wurde auch die Benutzerfreundlichkeit als entscheidender Vorteil angesehen, da die einfache Handhabung eines mobilen Endgeräts die Akzeptanz bei potenziellen Nutzern erhöht.

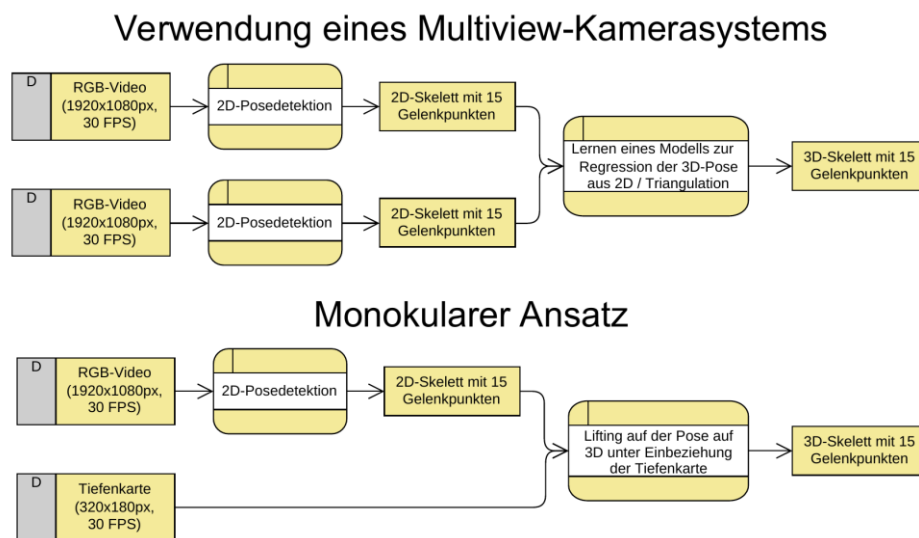


Abbildung 1: Mögliche Pipeline zur 3D-Skelettschätzung

Ergebnis:

- Datenflussdiagramm mit Definition der Modellpipeline und der Datenströme/-formate
- Auswahl der benötigten Hardware
- Festlegung des Skelettmodells

1.2 Arbeitspaket 2: Erstellung des Datensatzes

Ziel: Das Ziel von AP 2 ist die Erstellung eines praxisbezogenen Datensatzes, der die Erfassung und Verarbeitung von Bewegungsdaten in einer realitätsnahen Modellumgebung als Grundlage für die Optimierung maschineller Lernverfahren ermöglicht.

AP 2.1: Aufbau der praxisbezogenen Modellumgebung (IPH)

Ziel: Das Ziel des AP 2.1 ist der Aufbau einer praxisbezogenen Modellumgebung, um eine realitätsnahe Grundlage für die Datenerfassung in AP 2.2 zu schaffen.

Durchgeführte Arbeiten:

Der Aufbau der praxisbezogenen Modellumgebung fand am TNT im vorhandenen Motion-Capturing-Studio statt. Das Motion-Capturing-Studio ist neben Kameras und Arbeits-PCs mit einem Kraftmesssystem für Bodenreaktionskräften ausgestattet. Um möglichst verschiedene Hebetätigkeiten in der Modellumgebung abbilden zu können, wurde ein Regal integriert, mit Fächern auf unterschiedlichen Höhen. So können Hebetätigkeiten mit vertikaler (bücken, hochheben) und horizontaler (drehen) Verschiebung durchgeführt, sowie die Größe und das Gewicht der zu hebenden Objekte variiert werden.

Ergebnis:

- Konzept und finaler Aufbau der Versuchsumgebung

AP 2.2: Generierung des Datensatzes (TNT)

Ziel: Das Ziel von AP 2.2 ist die Generierung eines umfassenden Datensatzes, der durch die Erfassung von Bewegungsdaten mit verschiedenen Probanden in einer praxisbezogenen Modellumgebung als Grundlage für die Optimierung maschineller Lernverfahren dient.

Durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein Datensatz in Hinblick auf den in AP 3.2 folgenden Einsatz maschineller Lernverfahren aufgenommen. Wie bereits in AP 1.2 definiert, sollen RGB-Videos aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen werden. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus AP 3, welches zum Teil parallel ablief, wurde für die Datenaufnahme ein Durchführungsplan auf Basis der Anforderungen der Leitmerkmalermethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen beim manuellen Heben, Halten und Tragen von Lasten ≥ 3 kg (LMM-HHT-E) [Bau25] aufgestellt. Im Fokus stand dabei, dass alle in der LMM-HHT-E abgebildeten Körperhaltungen in unterschiedlicher Kombination mehrfach in den Aufnahmen vorkommen sollen. Abbildung 2 zeigt die Körperhaltungen nach LMM-HHT-E, die bei der Lastenhandhabung bei der Datengenerierung aufzunehmen sind. Es gibt vier grundsätzliche Poseklassen, die paarweise in beliebigen Kombinationen vorkommen können.



































Start / Ziel	Ziel / Start	Wichtung	Start / Ziel	Ziel / Start	Wichtung
		0	 	 	10 ³⁾
	 	3	 	 	13 ³⁾
 	 	5	 	 	15 ³⁾
		7	 	 	18 ³⁾
	 	9 ³⁾	 	 	20 ³⁾

Abbildung 2: Körperhaltung zur Bewertung der Lastenhandhabung mittels LMM-HHT-E

Zusätzlich sollen in den Videodaten die Verdrehung vom Oberkörper aufgenommen werden. Bei der Datenaufnahme wurden zwei iPhones (Typ 13 Pro) auf Stativen in unterschiedlichen Raumpositionen platziert. Für die Datenaufnahme per Video wurde in AP3 parallel zu AP2 eine App für iOS entwickelt, welche in Absatz AP3.2 tiefergehend beschrieben wird.

Für die umfangreiche Datenaufnahme wurden alle Körperposen nach LMM-HHT-E in unterschiedlicher Ausführung aufgenommen. Die Aufnahmen umfassen 5 Personen mit unterschiedlichen körperlichen Ausprägungen (Geschlecht, Größe, Figur, Kleidung), welche variierende Hebetätigkeiten in variierender Reihenfolge ausführen. Abbildung 3 zeigt eine Kameraperspektive, inkl. der Gelenkerkennung auf dem iPhone-Display und dem Regal im Hintergrund. Eine zweite Kamera, welche nicht im Bild zu sehen ist, ist seitlich zum Regal angeordnet.

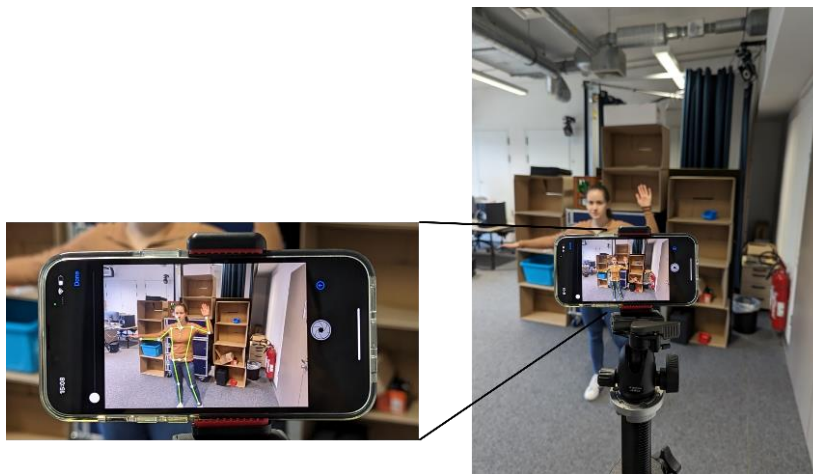


Abbildung 3: Perspektive einer Kamera bei Datenaufnahme

Für die automatisierte Positionserkennung werden die Video-Daten manuell mit der Software Label Studio [Tka20] gelabelt. Dabei wurden sowohl die vier verschiedenen Poseklassen (normal, leichter Offset, starker Offset, kniend) als auch die Lastaufnahme (ja, nein) annotiert. Die Sichtung der Videodaten hat ergeben, dass die Gelenkerkennung auf einer Kamera, welche die Person seitlich aufnimmt, aufgrund weniger Verdeckungen eine höhere Datenqualität enthält. Abbildung 4 zeigt schematisch eine vorteilhafte Kamerapositionierung zur Körperachse.



Abbildung 4: Vorteilhafte Aufnahmerichtung der Video-Daten

Ergebnis:

- 37 Videos von 5 Personen mit unterschiedlichen Körperausprägungen, welche alle Körperhaltungen der LMM-HHT-E wiederholt in unterschiedlicher Reihenfolge abbilden und auch die Verdrehung des Oberkörpers beinhalten

1.3 Arbeitspaket 3: Konzeption der Ergonomiebewertungsmethode

Ziel: Das Ziel von AP 3 ist die Entwicklung einer kräftebasierten Ergonomiebewertungsmethode (EBM) und eines Algorithmus zur Analyse und Bewertung von Arbeitsprozessen anhand von Bewegungsmustern und deren ergonomischer Auswirkungen.

AP 3.1: Entwicklung einer kräftebasierten Ergonomiebewertungsmetrik

Ziel: Das Ziel von AP 3.1 ist die Entwicklung einer kräftebasierten Ergonomiebewertungsmetrik durch die Analyse relevanter Bewegungs- und Kraftmerkmale.

Durchgeführte Arbeiten:

Zu Beginn des Arbeitspakets und parallel zum Arbeitspaket der Datengenerierung wurden relevante Bewegungs- und Kraftmerkmale auf ihre Eignung zur Ergonomiebewertung hin untersucht. Dafür wurde zunächst eine Recherche der etablierten Ergonomiebewertungsmethoden untersucht und mit einem Sportwissenschaftler diskutiert.

Die etablierten Bewertungsmethoden sind dabei Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Rapid Entire Body Assessment (REBA), Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) sowie eine Screening-Methoden zur Arbeitsplatzbeurteilung, der LMM-HHT-E. Der Fokus bei der Analyse der unterschiedlichen Bewertungsmethoden lag auf der Automatisierbarkeit und der Langzeittauglichkeit im Hinblick auf die Durchführung mittels Kamerasystem. Die Tabellen **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigen jeweils die Bewertung für eine der genannten Bewertungsmethoden.

Tabelle 2: RULA - Analyse der Bewertungsmethode

Positionserkennung gemäß Bewertungsmethode	Erlaubt eine Berechnung der Gliedmaßen durch Winkelermittlung zwischen den Gelenkpunkten, betrachtet nur den Oberkörper.
Betrachtung externer Kräfte	Betrachtet die Traglast innerhalb des Oberkörpers.
Betrachtung der Handhaltung	Verwendet die Position des Handgelenks und die Verdrehung des Handgelenks, was mit einer Posenschätzung erreicht werden kann. Kritisch bei verdeckten Händen durch zu tragendes Objekt.
Bewertungspunkte, nicht durch Kamera erfassbar	Traglast, Posenerkennung der Handgelenke bei Objekthandhabung

Tabelle 3: REBA - Analyse der Bewertungsmethode

Positionserkennung gemäß Bewertungsmethode	Erlaubt eine Berechnung der Gliedmaßen durch Winkelermittlung.
Betrachtung externer Kräfte	Betrachtet die Traglast.
Betrachtung der Handhaltung	Berücksichtigt die Position und die Abweichung des Handgelenks sowie den Griff am angehobenen Objekt. Kritisch bei verdeckten Händen durch zu tragendes Objekt.
Bewertungspunkte, nicht durch Kamera erfassbar	Traglast, Handhabung eines Objekts, Posenerkennung der Handgelenke bei Objekthandhabung

Table 4: EAWS - Analyse der Bewertungsmethode

Positionserkennung gemäß Bewertungsmethode	Benötigt eine Positionserkennung zur Beurteilung der Körperhaltungen.
Betrachtung externer Kräfte	Betrachtet Kräfte innerhalb des Oberkörpers.
Betrachtung der Handhaltung	Berücksichtigt die Position und die Abweichung des Handgelenks. Berücksichtigt zusätzlich Griffstärke und Fingerkräfte, welche schwer zu erfassen sind. Kritisch bei verdeckten Händen durch zu tragendes Objekt.
Bewertungspunkte, nicht durch Kamera erfassbar	Kräfte innerhalb des Körpers, Gegenstöße, Impulse, Vibrationen, Posenerkennung der Handgelenke bei Objekthandhabung, Auswirkung von Handschuhen bei der Arbeit

Table 5: LMM-HHT-E - Analyse der Bewertungsmethode

Positionserkennung gemäß Bewertungsmethode	Benötigt eine Positionserkennung zur Beurteilung der Körperhaltungen.
Betrachtung externer Kräfte	Detaillierte Bewertung des Lastgewichts bis zu 40 kg mit unterschiedlichen Punkten je nach Geschlecht
Betrachtung der Handhaltung	Einfache Hand- und Armpositionierung verwendet. Kritisch bei verdeckten Händen durch zu tragendes Objekt.
Bewertungspunkte, nicht durch Kamera erfassbar	Lastgewicht, Beeinträchtigung von Kleidung, Handhabung von Objekten, Posenerkennung der Handgelenke bei Objekthandhabung, Umgebungsbedingungen durch Wetter und Bodenbeschaffenheit sowie weitere arbeiterindividuelle Angaben

Eine Positionserkennung der Gelenke ist bei allen Bewertungsmethoden notwendig, wobei sich die Bewertung darin unterscheidet, ob Gelenkwinkel verwendet werden oder eine Klassifizierung von Gelenkpositionen durchgeführt wird. Bei allen vier Bewertungsmethoden werden Kräfte berücksichtigt. Dennoch ist die Erfassung der Kräfte bisher nicht durch eine Kamera möglich. Auch die Betrachtung der Hand- und Handgelenkposition ist theoretisch umsetzbar, geht jedoch in der Praxis mit großen Herausforderungen einher. Die Objekte in der Hand verdecken meist zu großen Teilen die Hände sowie Handgelenke, was zu einer schlechten Datenbasis für die Beurteilung führt. Alle Bewertungspunkte, die nicht durch eine Kamera erfasst werden können, müssen vom Bedienenden erfragt und somit manuell angegeben oder aus einer weiteren Datenquelle erfasst werden.

Da für alle Bewertungsmethoden die Möglichkeit zur Automatisierung besteht, wurde für die finale Auswahl einer Methodik die Meinungen von Experten des PA herangezogen. Aufgrund der Tatsache, dass die LMM-HHT-E besonders verbreitet in deutschen Unternehmen und eine umfangreiche, ergonomische Analyse des Arbeitsplatzes darstellt, wird sich in Rücksprache mit einem Sportwissenschaftler für diese Bewertungsmethode entschieden. Mit der Wahl dieser Methode soll für eine große Akzeptanz des Projektergebnisses gesorgt werden.

Die LMM-HHT-E [Bau25] gibt keine kurzfristige Information über gesundheitsschädliche Belastungen, sondern ist eine allgemeine Screening-Methoden zur Arbeitsplatzbeurteilung. Daher soll zusätzlich zur langfristigen Ergonomiebewertung nach LMM-HHT-E eine kurzfristige Meldung bei gesundheitsschädlichen Belastungen ermöglicht werden. Eine tiefgehende Recherche ergab, dass sich das Risiko mit der NIOSH Hebeformel [Nio94] berechnen lässt. NIOSH ist ein Werkzeug zur Berechnung eines Risikoindex für einzelne und mehrere manuelle Hebeaufgaben. Diese Anwendung liefert Risikoabschätzungen, um Hebeaufgaben zu

bewerten und die Häufigkeit von Verletzungen des unteren Rückens bei Arbeitnehmern zu verringern. Die NIOSH Hebeformel ermittelt eine empfohlene Gewichtsgrenze unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussparameter:

$$RWL = LC * HM * VM * DM * AM * FM * CM$$

- *RWL* = Recommended Weight Limit, empfohlene Gewichtsgrenze
- *LC* = 23 Kg
- *HM* = Multiplikator für die horizontale Position des Objekts
- *VM* = Multiplikator für die vertikale Position des Objekts
- *DM* = Multiplikator für die vertikale Bewegung des Objekts
- *AM* = Multiplikator für den Asymmetriewinkel/ Verdrehung des Körpers
- *FM* = Multiplikator für die Frequenz und Dauer des Hebevorgangs
- *CM* = Multiplikator für die Qualität der Objekthandhabung

Ergebnis:

- Konzept zur kurz- und langfristigen Bewertung der Ergonomie

AP 3.2: Entwicklung einer Methode zur visuellen Erfassung von Kräften

Ziel: Das Ziel des AP 3.2 ist die Adaption und Optimierung maschineller Lernverfahren zur visuellen Analyse von Bilddaten, mit Integration physikalischer Modelle zur Unterstützung der Ergonomiebewertung.

Durchgeführte Arbeiten: Für die automatisierte Umsetzung einer der in AP 3.1 vorgestellten Ergonomiebewertungsmethoden werden im ersten Schritt sowohl 2D als auch 3D-Posen bestimmt. In Hinblick auf die Kriterien Universalität, einfache Verfügbarkeit und Komplexität soll dazu auf die Hardware und das Software-Development-Kit (SDK) in Apples iPhone zurückgegriffen werden. Für die Ermittlung der wirkenden Kräfte wurde eine zunächst physikalische Optimierung umgesetzt, welche die Bodenreaktionskräfte und die internen Gelenkmomente bestimmt. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Analyse der Gelenk- und Bodenreaktionskräfte auf eine beispielhafte virtuelle Person, welche geht. Die Farben in der Visualisierung sind qualitativ in Bezug auf eine initiale Ruhephase (Stand) skaliert. Eine dunkelrote Einfärbung bezeichnet ein hohes Gelenkmoment im Vergleich zur Ruhepose.

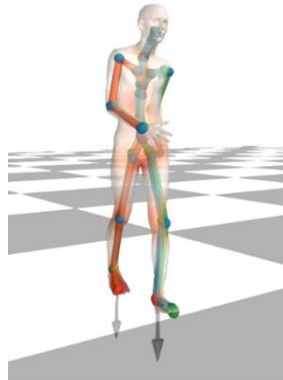


Abbildung 5: Qualitative Visualisierung von Gelenkkraften und Bodenreaktionskräften während des Gehens

Die Recherche zu maximal zulässigen Belastungen im Bereich der Gelenkmomente ergab, dass die häufigste Überbelastung durch Heben im Bereich des 5. Lendenwirbel und dem Kreuzbein (L5/S1) lokalisiert wird. Dabei ist eine allgemeine Aussage zur maximalen Belastung von einzelnen Gelenken nicht zu treffen, da dieses laut der Literatur personenindividuell vorliegt. Aus diesem Grund und der in AP 3.1 gewählten Ergonomiebewertungsmetriken, die eine quantitative Betrachtung der Kräfte nicht erfordert, wird sich bei der Berücksichtigung der maximalen Belastung auf die NIOSH-Gleichung bezogen (siehe AP 3.1). Um die Posen für die langfristige ergonomische Beurteilung nach LMM-HHT-E automatisch in unterschiedliche Haltungstypen zu klassifizieren, wird ein neuronales Netz mit Skip-Connections auf Basis einer ResNet-Architektur (Residual Network [He16]) genutzt.

Neben der Pose sind die getragenen Lasten ein entscheidender Faktor für die ergonomische Beurteilung. Jedoch weist eine kamerabasierte Schätzung der Gewichtskraft eines Objektes auf Basis von Bildinformationen und der daraus extrahierten Körperhaltung per Definition eine große Unsicherheit auf. Da der Körperschwerpunkt jederzeit durch die Standfläche gehen muss, welche von den Füßen der betrachteten Person aufgespannt wird, kann in der Theorie zwar ein Intervall der möglichen Traglast bestimmt werden. Jedoch lassen der individuelle muskuläre Körperbau, durch den die Last in einer Haltung unterschiedlich stark kompensiert werden kann, die Größe der Standfläche und die Unsicherheit in der Berechnung der Lage einzelner Körperteile (durch locker liegende Arbeitskleidung und nur ungenau bestimmbare Körperproportionen) keine ausreichend genaue Schätzung der Last zu. Externe Kräfte, welche durch das Tragen einer Last auf den Körper wirken, müssen daher als bekannt angenommen werden.

Zusammen mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses wurde in einer Sitzung über verschiedene Möglichkeiten zur Lastermittlung diskutiert. Individuell nach dem Unternehmen, in dem dieses System eingesetzt werden soll, können unterschiedliche Szenarien zur Bestimmung des Lastgewichts angewendet werden:

- Bei geringer Objektvariabilität kann eine kamerabasierte Methode verwendet werden, welche mittels Computer Vision und maschinellem Lernen das Lastgewicht bestimmt. Dabei können die für die Ergonomiebewertung aufgenommenen Videodaten verwendet und von KI-Modellen analysiert werden, um relevante Merkmale der Last zu extrahieren. Durch Objektdetektion und Bildsegmentierung wird die Last identifiziert und einem Gewicht zugeordnet.

- Lastsensoren an Regalen oder am Boden können das Gewicht des zu hebenden Objekts erfassen, bevor oder während dieses aufgenommen wird. Dieses ist allerdings teuer in der Umsetzung und erfordert neben einer großen Anzahl an Wagen auch festgelegte Lagerpositionen.
- Eine weitere vielversprechende Lösung ist die Lastermittlung mit Hilfe eines Lagerhaltungssystems, indem man auf Gewichtsdaten im Bestandsystem, wie z. B. im SAP zurückgreift. Dieses benötigt ein System, welches erfasst, von welchem Lagerplatz ein Objekt genommen wurde. Zur Ermittlung, von welchem Lagerort oder Regalfach ein Objekt genommen wurde können folgende Systeme verwendet werden
 - Kamerabasierte Erfassung
 - Lichtschranke
 - Barcode- oder RFID-Technologie

Die Auswahl des Verfahrens zur automatisierten Lastermittlung hängt stark von den individuellen Gegebenheiten der Anwender ab. Bei jedem Unternehmen sind die Bedingungen und Schnittstellen unterschiedlich, weshalb diese nicht im Forschungsprojekt berücksichtigt werden können.

Als dritte wesentliche Komponente für die ergonomische Beurteilung eines Arbeitsablaufs ist die Bestimmung des Start- und Endzeitpunktes eines Tragevorgangs von Bedeutung. Hierzu kommt eine Kombination aus Posenschätzung und Objektdetektion zum Einsatz. Es wird eine auf FasterRCNN [Ren15] basierende Architektur gewählt [Sha20], bei dem für jedes Paar von Hand und erkanntem Objekt ein Kontaktzustand vorhergesagt wird. Da es durch die seitliche Perspektive der Kamera zwangsweise zu Verdeckungen kommen kann, ist ein zusätzliches Postprocessing erforderlich. Außerdem hat sich gezeigt, dass eine zeitliche Glättung der ausgegebenen Wahrscheinlichkeiten für die erkannten Objekte und den Kontaktzustand sinnvoll ist.

Ergebnis:

- Methode zur Erfassung von Kräften durch Bestimmung der Pose, Last sowie des Start- und Endpunkts des Tragevorgangs gemäß LMM-HHT-E und NIOSH

1.4 Arbeitspaket 4: Softwaretechnische Umsetzung der Ergonomiebewertungsmethode

Ziel: Das Ziel von AP 4 ist die Entwicklung eines softwarebasierten Demonstrators zur Ergonomiebewertung, einschließlich einer benutzerfreundlichen Oberfläche, der universellen Portabilität und Analyse von Posen, Kräften und Bewegungen.

AP 4.1: Softwaretechnische Umsetzung der Ergonomiebewertungsmetrik

Ziel: Das Ziel des AP 4.1 ist eine Softwaretechnische Umsetzung einer echtzeitfähigen Bewertungsmetrik zur ergonomischen Bewertung von Arbeitsabläufen, einschließlich Warnsignalen und Datenspeicherung zur langfristigen Arbeitsplatzoptimierung.

Durchgeführte Arbeiten:

Aus AP 3 entsteht für die softwaretechnischen Umsetzung folgendes Konzept:

- Langfristige Auswertung der Belastung mit LMM-HHT-E

- Kurzfristige Auswertung der Belastung mit NIOSH Hebeformel in Echtzeit.

Zur Umsetzung der Auswertung der Belastung (lang- und kurzfristig) muss in Daten unterschieden werden, die von der Kameraauswertung erfasst werden und Daten, die vom Bediener manuell eingegeben oder aus einer Datenbank (DB) abgefragt werden müssen. Die verschiedenen Parameter zur Ergonomiebewertung, die Aufzeichnungsweise sowie die Zuordnung zur LMM oder NIOSH sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: : Parameter für die softwaretechnische Umsetzung

Parameter	Aufzeichnung	LMM-HHT-E oder NIOSH
Poseerkennung	Kamera	LMM-HHT-E
Zeitdauer der Teil-Tätigkeit	Kamera	LMM-HHT-E
Zeitdauer eine Haltetätigkeit	Kamera	LMM-HHT-E
Zeitlicher Abstand der Haltetätigkeit	Kamera	LMM-HHT-E
Häufigkeit der Hebetätigkeit	Kamera	LMM-HHT-E und NIOSH
Geschlecht	Manuelle Eingabe	LMM-HHT-E
Lastgewicht	Manuelle Eingabe/ DB	LMM-HHT-E und NIOSH
Lasthandhabung	Manuelle Eingabe	LMM-HHT-E und NIOSH
Arbeitsorganisation	Manuelle Eingabe	LMM-HHT-E
Umgebungsbedingungen	Manuelle Eingabe	LMM-HHT-E
Einschränkung durch Kleidung	Manuelle Eingabe	LMM-HHT-E
Winkel zwischen Körperteilen	Kamera	NIOSH

Die Auswertung der Parameter für die LMM und die NIOSH-Hebegleichung werden in Python durchgeführt. Dabei werden beispielsweise die einzelnen Multiplikatoren gemäß NIOSH durch Formeln bzw. Lookup-Tables ermittelt, Fallunterscheidungen implementiert, eine Schnittstelle zur Eingabe manueller Parameter implementiert und Statistiken über die Zeit gezählt. Aus den ermittelten Parametern können anschließend Warnsignale und Empfehlungen abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Bewertung werden mit den zugehörigen Posen in einem komprimierten DataFrame der Python-Bibliothek pandas gespeichert, um eine nachträgliche Begutachtung zu ermöglichen.

Ergebnis:

- Quasi-echtzeitfähige, softwaretechnisch umgesetzte Bewertungsmetrik

AP 4.2: Softwaretechnische Umsetzung der Kraft- und Bewegungserfassungssoftware

Ziel: Das Ziel des AP 4.2 ist die softwaretechnische Umsetzung und Optimierung der Skelettierungsmethoden

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem Arbeitspaket wurde die softwaretechnische Umsetzung der Körperposenschätzung und des Erkennens von Start und Ende eines Hebevorgangs durchgeführt.

Softwaretechnische Umsetzung der Körperposenschätzung:

In Hinblick auf die Kriterien Universalität, einfache Verfügbarkeit und Komplexität soll dazu auf die Hardware und das Software-Development-Kit (SDK) in Apples iPhone zurückgegriffen werden. Um eine möglichst akkurate Beurteilung gemäß NIOSH zu erreichen, sind die vom iPhone ermittelten Posen jedoch nicht genau genug. Daher wurde als Proof-of-Concept zusätzlich eine Regressionsmethode [Wan24] verwendet, die auf dem

Körpermodell SMPL [Lop15] basierende und Gelenkwinkel schätzt, aus denen mittels Vorwärtskinematik die Gelenkpositionen berechnet werden können. Das SMPL-Modell ist jedoch nicht lizenzfrei und nur im wissenschaftlichen Kontext frei nutzbar.

Für die langfristige ergonomische Beurteilung nach LMM-HHT-E, wird ein neuronaler Klassifikator mit den in AP 2 aufgenommenen und annotierten Daten trainiert.

Softwaretechnische Umsetzung des Erkennens von Start und Ende eines Hebevorgangs

Für das Training des Modells wurde auf den 100 Days of Hands Datensatz [Sha20] zurückgegriffen. In Hinblick auf das Kriterium der geringen Kosten bei einer kommerziellen Nutzung sollte darauf hingewiesen werden, dass es erforderlich wäre, zunächst einen vergleichbaren Datensatz zu erstellen. Dies könnte analog zu 100 Days of Hands aus YouTube-Videos geschehen, wobei jedoch nur Daten mit einer entsprechenden Creative Commons Lizenz herangezogen werden sollten. Hilfreich kann es sein, den Objektdetektor je nach Anwendungsfall gezielt mit bekannten Objekten nachzutrainieren.

Das anschließende Postprocessing wurde so implementiert, dass es zur Laufzeit rückwirkend auf einem Zeitfenster von 30 Frames (1 Sekunde) Fehler korrigiert und glättet. Dieser Parameter kann variiert werden.

Ergebnis:

- Modulare Implementierung der in AP 3.2 definierten Komponenten zur Bewegungs- und Kraftbeurteilung

AP 4.3: Einbettung der umgesetzten Methoden in einen Softwaredemonstrator mit Benutzerschnittstelle

Ziel: Das Ziel des AP 4.3 ist die Entwicklung einer benutzerfreundlichen und intuitiven grafischen Benutzerschnittstelle für den Softwaredemonstrator, die den in AP 1.1 definierten Anforderungen entspricht und eine einfache Nutzung durch Mitarbeiter nach kurzer Einweisung ermöglicht.

Durchgeführte Arbeiten:

Zu Beginn des AP 4.3 wurden die Anforderungen den Softwaredemonstrator (inkl. UI) definiert. Die Anforderungen sind in die Bereiche „funktional“, „technisch“ und „benutzerbezogen“ aufgeteilt:

Funktionale Anforderungen:

Erfassung und Verarbeitung von Bewegungsdaten:

- Posenanalyse aus den Kameradaten
- Echtzeit-Analyse von Hebevorgängen basierend auf der NIOSH-Hebegleichung
- Langfristige Bewertung der ergonomischen Belastung gemäß LMM-HHT-E

Dateneingabe:

- Eingabemöglichkeiten für manuelle Parameter
- Unterstützung durch Drop-Down-Menüs, Textfelder und Auswahloptionen

Warn- und Hinweisfunktion

- Automatische Warnung bei gesundheitsschädlichen Belastungen in Quasi-Echtzeit

- Signale bei ergonomisch bedenklichen Situationen

Auswertungsdarstellung:

- Darstellung der Analyseergebnisse in verständlicher Form

Technische Anforderungen:

Systemkompatibilität:

- Kompatibilität mit Standardhardware (z. B. iPhones, Kameras)

Quasi-Echtzeitfähigkeit:

- Geringe Latenz bei der Verarbeitung und Anzeige von Daten

Datenschutz und Sicherheit:

- Lokale Verarbeitung von personenbezogenen Daten auf dem Endgerät
- Einhaltung von Datenschutzrichtlinien (z. B. DSGVO)

Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit:

Intuitive Bedienbarkeit

- Einfache Navigation durch das UI ohne großen Schulungsaufwand
- Klar strukturierte Benutzeroberfläche.

Flexibilität:

- Anpassbarkeit an unterschiedliche Arbeitsumgebungen und Szenarien
- Möglichkeit zur Eingabe individueller Parameter

Visuelle Unterstützung:

- Integration Video-Bild und Skeletterkennung
- Farbmarkierungen zur Hervorhebung kritischer Belastungen (z. B. rot für hohe Belastung).

Um eine Benutzerschnittstelle zwischen Anwender und Software zu erstellen, wurde ein User Interface (UI) mit PyQt5 entwickelt. Das UI ermöglicht dem Anwender, alle manuellen Eingaben durch Texteingabe oder Auswahl in Drop-Down-Menüs vorzunehmen, die für die Durchführung der Ergonomiebewertung notwendig sind. Die Hauptansicht des UI bietet eine übersichtliche Darstellung der wesentlichen Informationen, die für den Anwender kurzfristig relevant sind. Abbildung 6 zeigt die Hauptansicht des UI. Dazu gehören:

Quasi-Echtzeitdaten: Die Ergebnisse der Bewegungsanalyse nach NIOSH zur kurzfristigen Auswertung des empfohlenen Lastgewichts und des Hebeindex. So kann der Bediener direkt das Risiko des Hebevorgangs analysieren.

Visualisierungen: Eine direkte Videoübertragung mit farblichen Markierungen zur Bewegungsverfolgung und ergonomischen Bewertung der Haltungen.

Benutzereingaben: Möglichkeiten, Parameter wie Gewicht oder Hebepositionen anzupassen, um unterschiedliche Szenarien zu simulieren.

Interaktive Elemente: Funktionen wie Start, Pause und Rückspulen, um bestimmte Frames oder Zeitpunkte im Video detailliert zu analysieren.

Farbcodierte Ergonomiewarnungen: Eine Liste mit Hebevorgängen, die basierend auf ihrer ergonomischen Bewertung farblich hervorgehoben sind (z. B. grün für ergonomisch akzeptabel, rot für kritisch).

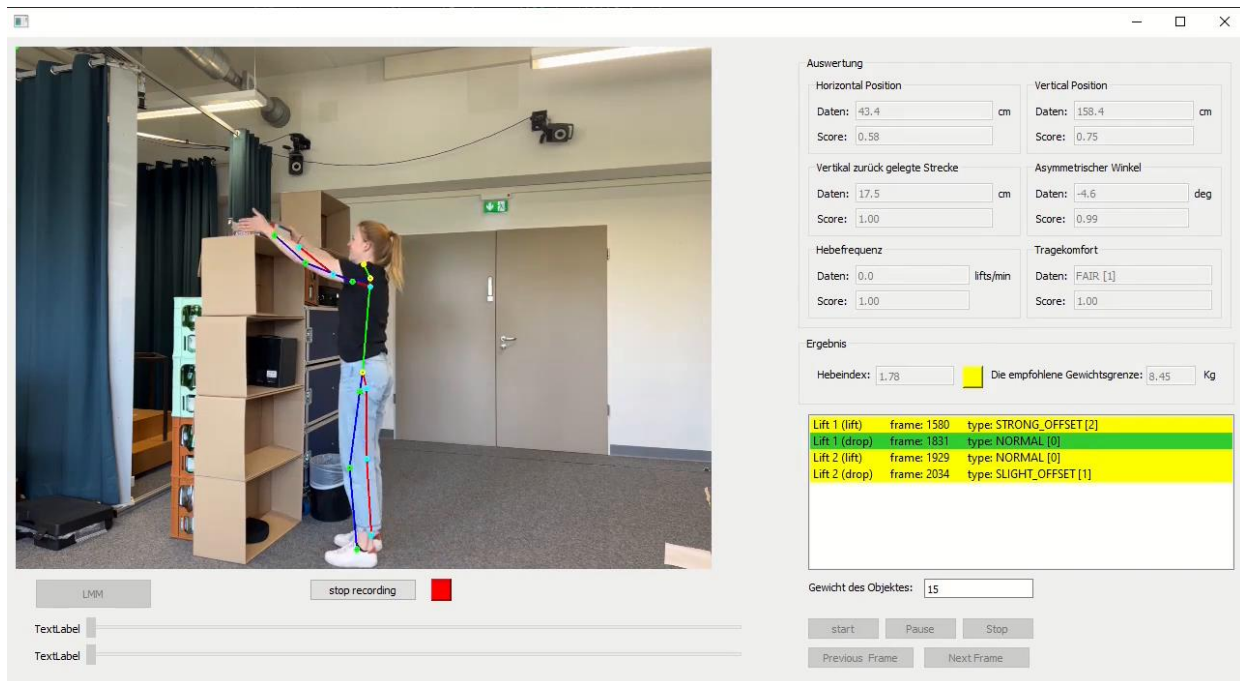


Abbildung 6: Hauptansicht des UI

Das UI ist so konzipiert, dass es eine intuitive Bedienung ermöglicht und gleichzeitig alle notwendigen Funktionen bereitstellt, um eine effiziente und präzise Bewertung der Arbeitsbedingungen durchzuführen. Die klare Struktur und die visuelle Unterstützung durch Echtzeit-Tracking verbessern die Benutzerfreundlichkeit und ermöglichen eine schnelle Interpretation der Ergebnisse.

Um den Bediener bei der Interpretation der NIOSH-Ergebnisse zu unterstützen, gibt es für den Anwender eine zusätzliche Seite, welche die Ergebnisse mit folgendem Text einordnet:

„Die NIOSH-Hebe-Gleichung ist ein Tool des National Institute for Occupational Safety and Health, das dazu dient, sichere Hebegrenzen in der Arbeitsumgebung zu bestimmen. Sie berücksichtigt Faktoren wie Gewicht, Haltung und Hebefrequenz, um Verletzungsrisiken, insbesondere Rückenprobleme, zu minimieren.

Die empfohlene Gewichtsgrenze (RWL) ist ein von der NIOSH-Hebe-Gleichung berechneter Wert, der das maximale sichere Gewicht angibt, das unter gegebenen Bedingungen gehoben werden kann. Der Hebeindex (LI) ist ein Verhältniswert, der das tatsächliche Gewicht eines gehobenen Objekts zum RWL vergleicht, wobei Werte über 1 ein erhöhtes Risiko für Verletzungen anzeigen.

Lifting-Index errechnet sich aus dem zu hebenden Gewicht, geteilt durch die empfohlene Gewichtsgrenze:

< 1: kein Risiko: keine Maßnahmen notwendig

1-1.5: geringes Risiko: Aufmerksamkeit auf die Wiederholungen und das Gewicht legen und versuchen den Hebeindex zu verringern

1,5-2: mittleres Risiko: Umstrukturierung der Hebeaufgabe zur Verringerung der Hebeindex

2-3: hohes Risiko: Änderung der Hebeaufgabe mit hoher Priorität


> 3: Sofortige Änderung der Hebeaufgaben

Die NIOSH-Hebe-Gleichung basiert auf einer Reihe von Annahmen, die dazu dienen, die Anwendung der Gleichung zu vereinfachen und zu standardisieren. Diese Annahmen umfassen:

- Arbeitsplatzgestaltung: Es wird angenommen, dass der Arbeitsplatz so gestaltet ist, dass der Hebevorgang in einer idealen Umgebung stattfindet, ohne Hindernisse oder ungewöhnliche Bedingungen.*
- Hebebedingungen: Es wird davon ausgegangen, dass die Hebebedingungen stabil sind und die Lasten gleichmäßig verteilt sind, was eine kontrollierte und vorhersehbare Hebeaktion ermöglicht.*
- Körperhaltung: Die Gleichung nimmt an, dass die Körperhaltung des Arbeiters beim Heben ergonomisch ist, wobei der Rücken gerade und die Last nah am Körper gehalten wird.*
- Gesundheitszustand: Es wird vorausgesetzt, dass alle Arbeiter gesund sind und keine vorbestehenden Bedingungen haben, die ihr Risiko für Hebeverletzungen erhöhen könnten.*
- Hebefrequenz: Die Hebefrequenz und die Dauer des Hebevorgangs sind moderat, sodass Ermüdung und Überbeanspruchung minimiert werden.*
- Ein-Hand-/Zwei-Hand-Heben: Die Gleichung geht von einem Zwei-Hand-Heben*
- Erfahrung und Training: Es wird angenommen, dass die Arbeiter angemessen geschult sind in den Techniken des sicheren Hebens.“*

Die Auswertung der LMM ist nicht auf der Hauptansicht enthalten, da diese eine Auswertung nach der Gesamttätigkeit ist und nicht während der Hebetätigkeit stattfinden kann. Bei der Auswertung der LMM nach der Hebetätigkeit wird der Punktwert wiedergegeben, welche die Hebetätigkeiten während der Arbeit erreichen. Zudem wird dem Anwender eine von der LMM vorgegebene Tabelle zur Interpretation des Punktwerts zur Verfügung gestellt, siehe Tabelle 7. Diese Tabelle gibt dem Anwender zusätzlich grobe Maßnahmen an die Hand.

Tabelle 7: Tabelle zur Beurteilung der Ergonomiebewertung nach LMM

Anhand des errechneten Punktwertes und der folgenden Tabelle kann eine grobe Beurteilung vorgenommen werden:					
Risiko	Risiko- bereich	Belastungs- höhe ¹⁾	a) Wahrscheinlichkeit körperlicher Überbeanspruchung b) Mögliche gesundheitliche Folgen	Maßnahmen	
	1	< 20 Punkte	gering	a) Körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich b) Gesundheitsgefährdung nicht zu erwarten	Keine
	2	20 - < 50 Punkte	mäßig erhöht	a) Körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. b) Ermüdung, geringgradige Anpassungsbeschwerden, die in der Freizeit kompensiert werden können	Für vermindert belastbare Personen sind Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sinnvoll.
	3	50 - < 100 Punkte	wesentlich erhöht	a) Körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich b) Beschwerden (Schmerzen) ggf. mit Funktionsstörungen, meistens reversibel, ohne morphologische Manifestation	Maßnahmen zur Gestaltung und sonstige Präventionsmaßnahmen sind zu prüfen.
	4	≥ 100 Punkte	hoch	a) Körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. b) Stärker ausgeprägte Beschwerden und / oder Funktions- störungen, Strukturschäden mit Krankheitswert	Maßnahmen zur Gestaltung sind erforderlich. Sonstige Präventions- maßnahmen sind zu prüfen.

Ergebnis:

- Umgesetzte grafische Benutzerschnittstelle

1.5 Arbeitspaket 5: Evaluierung und Praxistest des Ergonomiebewertungssystems

Ziel: Das Ziel von AP 5 ist die Evaluierung und Validierung der automatisierten Methode zur Ergonomiebewertung hinsichtlich ihrer Zielerreichung, Praxistauglichkeit und ethischen Vertretbarkeit in definierten Modellumgebungen und unter realen Arbeitsbedingungen.

AP 5.1: Evaluierung innerhalb einer definierten Modellumgebung

Ziel: Das Ziel vom Unterarbeitspaket AP 5.1 ist die Evaluierung innerhalb der in AP 1 definierten Modellumgebung.

Durchgeführte Arbeiten:

Dafür wurden die in AP 2 aufgenommenen Daten in Trainings- und Testdatensätze unterteilt. In diesem AP wurden die Testdatensätze verwendet, um die Ergonomiebewertung zu evaluieren. Für die Darstellung wurde eine Konfusionsmatrix verwendet. Diese ist ein geeignetes Werkzeug zur Evaluierung der Leistung von Klassifikationsmodellen. Daher eignet sich die Konfusionsmatrix zur Evaluierung der Leistung der entwickelten Ergonomiebewertungsmethode, insbesondere in Bezug auf die Klassifikation der verschiedenen Körperhaltungen und Bewegungsabläufe, die im Rahmen des Projekts erfasst und bewertet werden. In der Konfusionsmatrix werden die Ergebnisse der gelabelten Testdaten den vorhergesagten Ergebnissen gegenübergestellt. Die Genauigkeit (Accuracy) in der Konfusionsmatrix wird durch den Anteil der korrekt klassifizierten Beispiele an der Gesamtzahl der Beispiele berechnet. Sie gibt an, wie gut das Modell insgesamt bei der Klassifizierung der Daten abschneidet.

In der ersten Untersuchung wurde die Konfusionsmatrix der Testdaten verglichen, welche von zwei unterschiedlichen Personen gelabelt wurden. Abbildung 7 zeigt die Konfusionsmatrix unter Verwendung aller Videosequenzen aus der Testdatei, welche von zwei unterschiedlichen Personen gelabelt wurden. Die korrekt identifizierten Posen liegen auf der Hauptdiagonalen und sind mit einem roten Kreis markiert. Es ist erkennbar, dass die Genauigkeiten der beiden Konfusionsmatrizen unterschiedlich sind. Dieses verdeutlicht den Einfluss von Subjektivität innerhalb des Datenlabeling und somit auch auf das Ergebnis der Ergonomiebewertung.

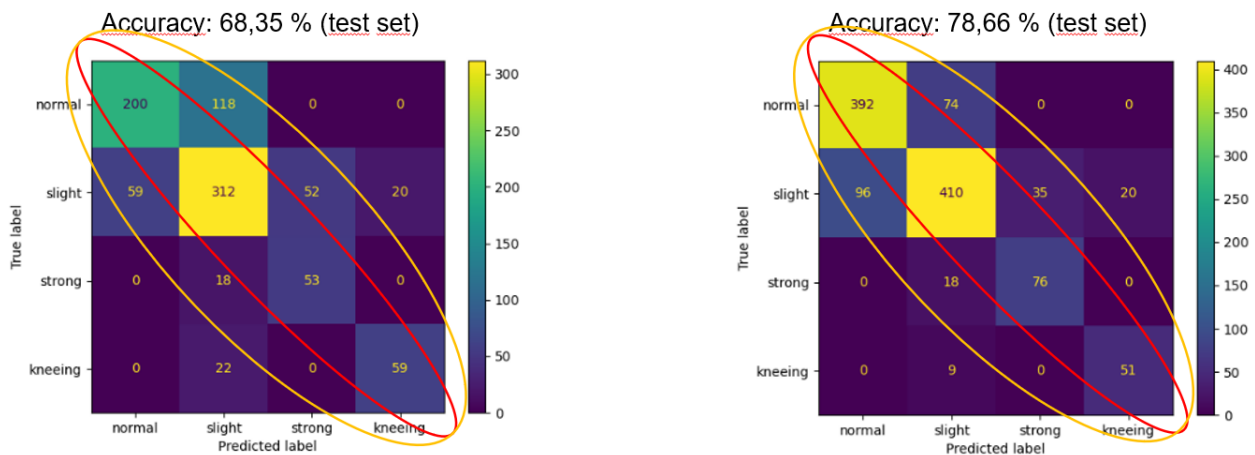


Abbildung 7: Konfusionsmatrix der Testdaten, Untersuchung des Einflusses von Subjektivität

Diese Subjektivität entsteht, da in der LMM-HHT-E die Körperposen in grobe Klassen unterteilt sind, siehe Abbildung 8. In der Realität gibt es jedoch auch Körperposen, die zwischen den Posen der LMM-HHT-E liegen und nicht vollkommen objektiv einer Pose zugeordnet werden konnten. Die Interpretation des Einflusses der „unklar“ definierten Posenübergänge wird dadurch unterstrichen, dass die meisten Fehl-Schätzungen an einer benachbarten Pose auftreten. Diese sind in Abbildung 7 mit einem orangen Kreis markiert. Abbildung 9 veranschaulicht die Herausforderung beim Labeln der Körperposen. Es besteht eine unvermeidbare Subjektivität beim Labeln der Körperposen zwischen den verschiedenen Posen. In diesem Beispiel ist das mittlere Bild nicht eindeutig einem leichten oder starken Offset zuzuordnen.

Diese Zuordnung könnte verbessert werden, indem eine Einteilung der Winkel der Extremitäten Körperposen zugeordnet werden und so Bewegungsbereiche entstehen, in denen sich diese Posen aufhalten. Dieses wird u. a. in der RULA-Methode.

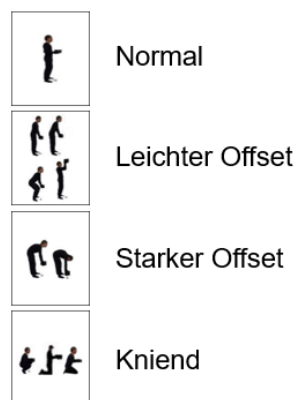


Abbildung 8: Körperposen der LMM-HHT-E

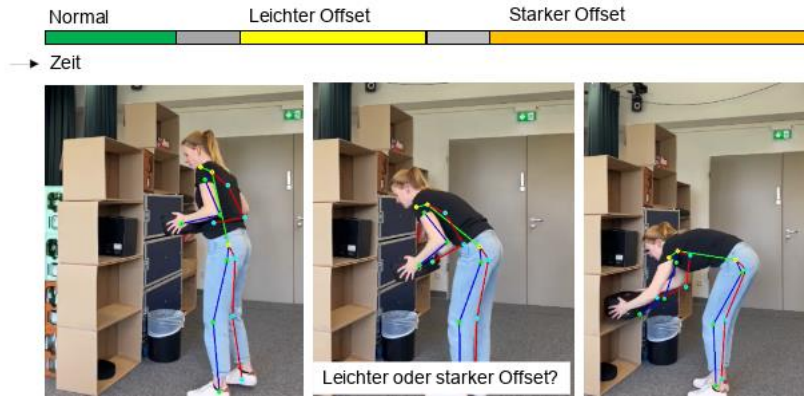


Abbildung 9: Darstellung der Herausforderung bei dem Labeln der Körperposen

Um den Einfluss der unklaren Posenübergänge auf die Evaluation zu vermeiden, wurde die Auswertung auf die Datenframes zum Zeitpunkt des Kontaktwechsels (Lastaufnahme und Lastablage) begrenzt. Dieses basiert auf der Annahme, dass die „extremsten“, also die am höchsten bewerteten Körperposen zum Zeitpunkt der Lastaufnahme oder Lastablage eingenommen werden. Abbildung 10 zeigt die Konfusionsmatrix zum Zeitpunkt der Lastwechsel. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Genauigkeit der Vorhersage in den beiden unterschiedlich gelabelten Datensätzen auf > 88 % gestiegen ist. Zudem liegt die Genauigkeit auf beiden Datensätzen nun dicht beieinander. Dieses unterstreicht die Annahme, dass die Lastwechsel meist in eindeutigen, statischen Posen vorgenommen werden und so die Subjektivität des Datenlabelings verringert wird.

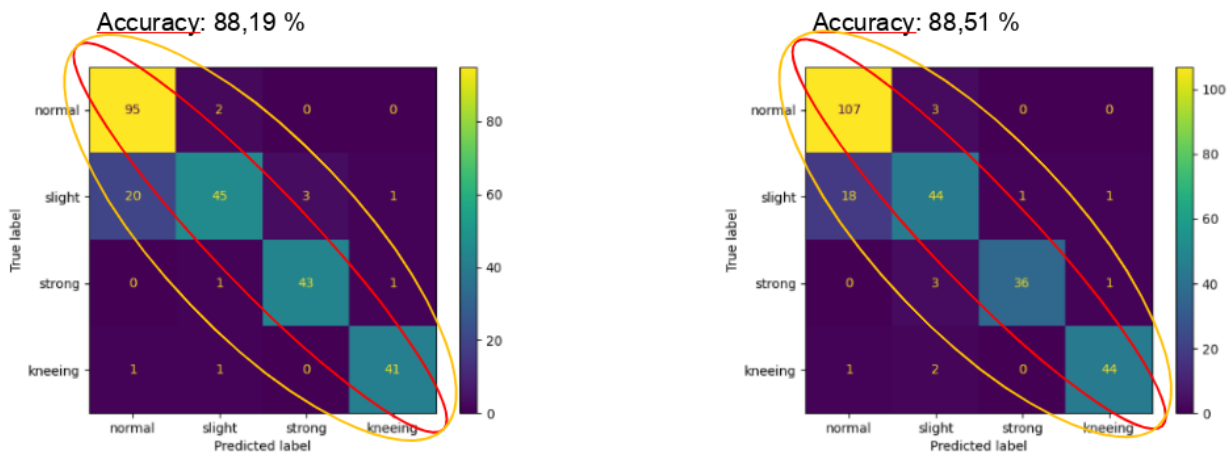


Abbildung 10: Konfusionsmatrix der Testdaten, Untersuchung der Vorhersagegenauigkeit zum Zeitpunkt des Lastwechsels

Eine weitere Herausforderung bei der Auswertung bleibt die Sichtbarkeit des zu tragenden Objekts. Eine Verdeckung des Objekts kann stattfinden, wenn dieses z. B. sehr klein ist und durch die Hand verdeckt wird oder der Körper das Objekt verdeckt, wenn die Person sich mit dem Rücken zu Kamera dreht. Abbildung 11 veranschaulicht die Objektverdeckung in den aufgenommenen Daten.



Abbildung 11: Veranschaulichung von Möglichkeiten zur Verdeckung des zu tragenden Objekts

Wenn das Objekt für längere Zeit verdeckt ist und nicht mehr in der Hand erkannt wird, geht das System von einem Lastübergang aus. Dieses verfälscht den Zeitpunkt des Lastwechsels und kann die Vorhersagegenauigkeit verringern.

Ergebnis:

- Evaluierte Ergonomiebewertung im Bezug auf die Genauigkeit der Poseschätzung
- Untersuchung des Einflusses der Subjektivität

AP 5.2: Evaluierung bei Projektpartnern unter Realbedingungen

Ziel: Ziel des AP 5.2 ist Evaluierung der Praxistauglichkeit der entwickelten EBM

Durchgeführte Arbeiten:

Für die Evaluierung der Praxistauglichkeit konnte das System bei einem Logistikdienstleister aus dem Raum Hannover getestet werden. Hierbei wurde die Kamera im Lager aufgestellt und die Kommissionier- und Verpackungsarbeiten untersucht. Abbildung 12 zeigt einen Ausschnitt eines Videos an einem Kommissionierarbeitsplatzes.



Abbildung 12: Video-Ausschnitt bei Kommissionieraufgaben

Folgende Erkenntnisse ergaben sich aus den Gesprächen mit Mitarbeitern:

- Die Mitarbeiter kannten sich mit den Regeln für ergonomisches Heben aus, haben ein unergonomisches Heben aber aus Effizienzgründen in Kauf genommen
- Die Überwachung der Arbeitsaktivität mit einer Kamera wird von vielen Mitarbeitern abgelehnt.

Folgende Erkenntnisse ergaben sich aus der Datenauswertung:

- Der Einfluss der Bewertungsgenauigkeit wird beeinflusst durch:
 - Die Beleuchtung
 - Der Unterschied der Farbe des zu tragenden Objekts und dem Hintergrund
 - Andere Bewegungsabläufe, die nicht in der Bewertungsmethode berücksichtigt sind, wie z. B. Schieben.

Ergebnis:

- Evaluiertes Gesamtsystem in einer Praxisumgebung
- Darstellung der Herausforderungen der Anwendung in der Praxis

AP 5.3: Ethische Diskussion

Ziel: Das Ziel von AP 5.3 ist die ethische Bewertung der EBM unter Berücksichtigung von Funktionsfähigkeit, Datenschutz, Kosten-Nutzen-Verhältnis und Praxistauglichkeit, um klare Rahmenbedingungen für ihren industriellen Einsatz zu definieren.

Durchgeführte Arbeiten:

Zur Bewertung der ethischen und praktischen Aspekte des Einsatzes der in AP 1-5 umgesetzten Methode zur automatisierten Ergonomiebewertung wurden zunächst Kriterien festgelegt. Folgende Kriterien wurden ausgearbeitet:

- Persönlichkeitsrechte und Datenschutz: Werden die Rechte der Arbeitnehmer gewahrt, und ist der Datenschutz ausreichend gewährleistet?
- Kosten-Nutzen-Verhältnis: Rechtfertigen die Vorteile des Systems die finanziellen und betrieblichen Investitionen?
- Funktionsfähigkeit und Mehrwert für den Arbeitnehmer: Unterstützt das System eine nachhaltige Verbesserung der Arbeitsbedingungen?
- Mögliche Alternativen: Gibt es weniger invasive oder kosteneffizientere Lösungen?

Tabelle 8 fasst die Ergebnisse der Kriterien Persönlichkeitsrechte und Datenschutz, Kosten-Nutzen-Verhältnis sowie die Funktionsfähigkeit und der Mehrwert für den Arbeitnehmer zusammen, welche im Anschluss tiefergehend diskutiert werden. Diese Ergebnisse wurden mit dem Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert. In der weiterführenden Diskussion konnten Zielgruppen und Rahmenbedingungen abgeleitet werden.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Diskussionsergebnisse der Kriterien Datenschutz, Kosten und Funktionsfähigkeit

Datenschutz	Kosten	Funktionsfähigkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitung personenbezogener Daten erfolgt lokal auf den Endgeräten • Videodaten können weggelassen werden, sodass nur das abstrahierte Skelettmodell sichtbar ist, was den Schutz der Persönlichkeitsrechte stärkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei vorhandener, rechenstarker Hardware fallen die Kosten niedrig aus • Für Unternehmen ohne entsprechende Infrastruktur können die Kosten höher sein, was insbesondere für KMU berücksichtigt werden muss 	<ul style="list-style-type: none"> • EBM wurde als funktionsfähig und innovativ bewertet • Kombination aus kurzfristiger Belastungsanalyse (NIOSH) und langfristiger Screening-Methode (LMM-HHT-E) ermöglicht effektive ergonomische Unterstützung • Klare Prävention und Reduktion gesundheitsschädlicher Belastungen

Die festgelegten Kriterien wurden zunächst unter den wissenschaftlichen Bearbeitern des Forschungsprojekts betrachtet, bevor diese in einer Sitzung des PA diskutiert. Es wurde ein offener Dialog geführt, um potenzielle ethische Konflikte wie Überwachung am Arbeitsplatz, Datenspeicherung oder Benachteiligung bestimmter Arbeitnehmer entwickelten automatisierten EBM zu identifizieren und mögliche Lösungsansätze zu erfassen.

Die Ergebnisse der ethischen Diskussion zu AP 5.3 zeigen, dass die umgesetzte EBM als funktionsfähig und innovativ bewertet wurde. Besonders positiv hervorgehoben wurde die Kombination aus kurzfristiger Belastungsanalyse (NIOSH) und langfristiger Screening-Methode (LMM-HHT-E), die eine effektive Unterstützung zur Verbesserung der ergonomischen Arbeitsbedingungen bietet. Auch der datenschutzkonforme Ansatz, bei dem die Verarbeitung personenbezogener Daten lokal auf den Endgeräten erfolgt, wurde als vorbildlich eingestuft. Ein klarer Mehrwert für Arbeitnehmer wurde ebenfalls erkannt, da das System dazu beiträgt, gesundheitsschädliche Belastungen zu reduzieren und präventiv zu wirken.

Ein potenzieller Kritikpunkt betraf die wahrgenommene Überwachung am Arbeitsplatz, was eine transparente Kommunikation mit den Arbeitnehmern erfordert. Ein wichtiger Aspekt ist, dass die aufgenommenen Videodaten im Nachgang verworfen werden können, sodass nur ein abstrahiertes Skelettmodell aus Strichen und Punkten visualisiert wird. Dieses Vorgehen ermöglicht die Nachverfolgung besonders kritischer Bewegungsvorgänge, ohne Rückschlüsse auf die Identität der Person zuzulassen. Diese Option ist einfach umsetzbar und stärkt den Schutz der Persönlichkeitsrechte, wodurch die Akzeptanz des Systems bei den Mitarbeitern weiter gesteigert werden kann.

Hinsichtlich der Investitionskosten wurde festgestellt, dass diese für Unternehmen mit einem bereits vorhandenen, rechenstarken Computer niedrig ausfallen können, da keine zusätzlichen Hardwarekomponenten benötigt werden. In solchen Fällen ist die Implementierung des Systems kosteneffizient und schnell umsetzbar. Für Unternehmen ohne entsprechende Infrastruktur könnten die Kosten höher sein, was insbesondere für KMU berücksichtigt werden muss.

Während der Besuche bei Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses wurde zudem festgestellt, dass die Theorie oft von der Praxis abweicht. Zwar wissen die Mitarbeiter häufig, wie sie sich ergonomisch korrekt bewegen sollten, entscheiden sich jedoch bewusst dagegen, da die nicht ergonomische Ausführung von Bewegungen in vielen Fällen schneller und praktischer ist. Dies unterstreicht die Bedeutung, nicht nur

auf Aufklärung und Schulung zu setzen, sondern auch die Arbeitsprozesse so zu gestalten, dass ergonomisch korrektes Verhalten einfacher und effizienter in den Arbeitsalltag integriert werden kann.

Daher eignet sich das System besonders für Maschinenbauer und Unternehmen, die Arbeitsplätze gestalten. Diese können die EBM nutzen, um bereits in der Entwicklungsphase neue Arbeitsplätze schnell und effizient auf ihre ergonomische Tauglichkeit zu bewerten und Anpassungen vorzunehmen, bevor diese in der Praxis eingeführt werden.

Um die Einführung des Systems zu erleichtern und mögliche Bedenken auszuräumen, wurden klare Rahmenbedingungen empfohlen. Dazu gehören transparente Kommunikationsrichtlinien, die eine enge Abstimmung mit Arbeitnehmervertretungen und umfassende Informationen zum Nutzen des Systems sicherstellen. Ergänzend wurde vorgeschlagen, Schulungsprogramme anzubieten, um die Bedienung und Akzeptanz der EBM zu fördern. Schließlich sollte das System zielgerichtet an Arbeitsplätzen mit hoher ergonomischer Belastung eingesetzt werden, um die Wirkung bei geringem Ressourceneinsatz zu maximieren. Insgesamt wurde festgestellt, dass die EBM ein ethisch vertretbares und praxistaugliches System ist, sofern sichergestellt wird, dass die vorgeschlagenen Rahmenbedingungen konsequent eingehalten werden.

Zudem wurden Alternativen zu der automatisierten EBM diskutiert. Es gibt kostengünstigere EBM, welche auch im Antrag für das Forschungsprojekt genannt wurden, jedoch Einschränkungen in Bezug auf Präzision, Langzeit-tauglichkeit und Automatisierung haben. Im Folgenden werden die bestehenden Alternativen mit ihren Vor- und Nachteilen aufgelistet:

Manuelle Ergonomiebewertungen

- Beschreibung:
 - Ergonomische Analysen werden durch Experten vor Ort durchgeführt, basierend auf Beobachtungen und standardisierten Checklisten wie RULA, REBA oder LMM-HHT-E.
- Vorteile:
 - Keine technische Infrastruktur erforderlich.
 - Einmalige Kosten für den Einsatz von Experten.
- Nachteile:
 - Subjektive Einschätzungen durch den Analysten.
 - Keine Echtzeitanalyse und begrenzte Wiederholbarkeit.
 - Hoher Zeitaufwand bei regelmäßigen Bewertungen.

Workshops und Schulungen

- Beschreibung:
 - Mitarbeiterschulungen zu ergonomisch korrektem Verhalten und Belastungsprävention.
- Vorteile:
 - Geringe Investitionskosten.
 - Förderung des Bewusstseins für Ergonomie.
- Nachteile:

- Keine direkte oder automatisierte Überprüfung der Ergonomie am Arbeitsplatz.
- Verhaltenstraining oft ineffektiv, wenn die Arbeitsbedingungen ergonomisches Verhalten erschweren.

Tragen von Sensoren

- Beschreibung:
 - Einsatz von tragbaren Sensoren (z. B. Accelerometer oder Wearables) zur Bewegungsüberwachung oder von Bodenmatten/Kraftsensoren zur Belastungsmessung.
- Vorteile:
 - Relativ kostengünstig zu implementieren.
 - Lokale und gezielte Messung einzelner Aspekte.
- Nachteile:
 - Keine umfassende Bewertung des gesamten Arbeitsablaufs.
 - Benötigte Expertise beim Anbringen und Kalibrieren der Sensoren
 - Begrenzte Integration in komplexe Arbeitsumgebungen.
 - Potenzielle Unannehmlichkeiten durch das Tragen von Geräten.

Vergleich zur entwickelten Methode:

Die entwickelte EBM ist umfassender, da sie sowohl eine Quasi-Echtzeitanalyse als auch eine Langzeitbewertung kombiniert. Sie ermöglicht eine automatisierte und detaillierte Ergonomieanalyse, die besonders für Unternehmen geeignet ist, die Arbeitsplätze entwickeln oder regelmäßig überprüfen müssen. Weniger invasive oder kosteneffizientere Lösungen könnten in spezifischen Fällen ausreichen, erreichen jedoch nicht die gleiche Präzision, Automatisierung und Benutzerfreundlichkeit wie die entwickelte Methode.

Ergebnis:

- Definierte Rahmenbedingungen für einen ethisch vertretbaren Einsatz des Systems
- Identifizierte Anwendungsbereiche
- Bestätigung der Praxistauglichkeit

1.6 Arbeitspaket 6: Dokumentation und Ergebnistransfer

Ziel: Das Ziel von AP6 ist die Dokumentation der Projektergebnisse.

Durchgeführte Arbeiten:

Im Verlauf des Projekts wurden vielfältige Möglichkeiten genutzt, um interessierte Unternehmen über die (Teil-)Ergebnisse zu informieren. Dies geschah über verschiedene Kanäle wie Online-Plattformen, Printmedien und Vorträge, um eine breite Wissensvermittlung und Verbreitung der Ergebnisse zu gewährleisten. Das Projektmanagement sorgte dabei für eine systematische und strukturierte Organisation des Forschungsprozesses und stellte sicher, dass die Ergebnisse im Rahmen des geplanten Zeit- und Ressourcenaufwands erzielt wurden.

Ergebnis:

- Veröffentlichung, Zwischenberichte, Schlussbericht und erfolgreich durchgeführtes Projekt

2 Verwendung der Zuwendung

Nachfolgend sind die Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben für Personenmonate des wissenschaftlichen Personals gemäß Beleg über Beschäftigungszeiten (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans), für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) aufgeführt:

Für die Durchführung der Arbeiten wurde das folgende Personal nach benötigt und eingesetzt:

Arbeitspaket	Personalkategorie	PM
AP 1	Wissenschaftliche Mitarbeitende (HPA-A)	4 (IPH), 2 (TNT)
	Wiss.-Technische Mitarbeitende (HPA-B)	0
AP 2	Wissenschaftliche Mitarbeitende (HPA-A)	6 (IPH), 8 (TNT)
	Wiss.-Technische Mitarbeitende (HPA-B)	0
AP 3	Wissenschaftliche Mitarbeitende (HPA-A)	6 (IPH), 8 (TNT)
	Wiss.-Technische Mitarbeitende (HPA-B)	2 (IPH)
AP 4	Wissenschaftliche Mitarbeitende (HPA-A)	5 (IPH), 3 (TNT)
	Wiss.-Technische Mitarbeitende (HPA-B)	7 (IPH)
AP 5	Wissenschaftliche Mitarbeitende (HPA-A)	2 (IPH), 3,35 (TNT)
	Wiss.-Technische Mitarbeitende (HPA-B)	0
AP 6	Wissenschaftliche Mitarbeitende (HPA-A)	1 (IPH), 1 (TNT)
	Wiss.-Technische Mitarbeitende (HPA-B)	0
Summe		24 (IPH), 25,35 (TNT) 9 (IPH)

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - entfällt
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - entfällt

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Forschungsprojekt AkEvAp geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Die intensive Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss, die kontinuierliche Abstimmung mit externen Fachexperten sowie die methodisch fundierte Durchführung der Arbeitspakete haben die Relevanz des identifizierten Problems und die Zielsetzung des Projekts bestätigt: KMU benötigen praxistaugliche, kosteneffiziente und datenschutzkonforme Lösungen zur ergonomischen Bewertung von Arbeitsplätzen, um krankheitsbedingte Ausfälle zu reduzieren und die Arbeitsbedingungen nachhaltig zu verbessern.

Besonders in KMU fehlen häufig die Ressourcen, um etablierte, aber kostenintensive Ergonomiebewertungssysteme zu implementieren. Die im Projekt entwickelte Lösung, bestehend aus einer kamerabasierten Skelettierungsmethode, einer softwarebasierten Bewertung unter Nutzung der LMM- und NIOSH-Methodik sowie einem benutzerfreundlichen Demonstrator, adressiert diese Lücke konsequent. Die Systemlösung vereint wissenschaftlich fundierte Bewertungsansätze mit moderner Technologie und wurde in enger Rückkopplung mit praktischen Anwendungspartnern iterativ entwickelt und getestet.

Die Notwendigkeit des Projekts zeigte sich auch im Rahmen der Evaluierung und der ethischen Diskussion: Die Nutzung der EBM wurde von Projektpartnern als sinnvoll und praxisrelevant bewertet, insbesondere im Hinblick auf die frühzeitige Erkennung gesundheitsschädlicher Belastungen und die Gestaltung ergonomischer Arbeitsplätze in der Planungsphase. Die Rückmeldungen aus dem Feld bestätigen, dass ohne die durch AkEvAp entwickelte Methodik zahlreiche ergonomische Risiken nicht automatisiert und derzeit nur unter hohen personellen Aufwendungen erkannt werden könnten.

Auch der personelle und technische Aufwand, der durch die Entwicklung und Integration von Verfahren zur Bewegungserkennung, Kraftanalyse und ergonomischen Bewertung notwendig war, ist im Kontext der Zielsetzung als angemessen zu beurteilen. Die Anwendung bestehender Methoden war allein nicht ausreichend, um eine automatisierte, kamerabasierte Bewertung in Quasi-Echtzeit unter Berücksichtigung der arbeitsplatzspezifischen Besonderheiten in KMU zu ermöglichen. Daher war die konzeptionelle, softwaretechnische und evaluative Tiefe der durchgeführten Arbeiten essenziell für den Projekterfolg.

Die Projektförderung erscheint in Anbetracht der erarbeiteten Ergebnisse und des Innovationsgrades als gerechtfertigt. Das entwickelte System bietet eine praxisnahe, skalierbare und datenschutzkonforme Lösung zur ergonomischen Bewertung, mit hohem Mehrwert für KMU. Die durchgeführte Arbeit vom IPH und TNT war somit nicht nur notwendig, um das Projektziel zu erreichen, sondern auch angemessen im Hinblick auf Aufwand, Nutzen und Ergebnisqualität.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Das Forschungsprojekt AkEvAp hatte das Ziel, eine automatisierte, kamerabasierte ergonomische Bewertung von Arbeitsplätzen zu entwickeln, die speziell auf die Bedürfnisse von KMU zugeschnitten ist. Die im Projekt erzielten Ergebnisse bieten sowohl aus wissenschaftlich-technischer als auch

aus wirtschaftlicher Perspektive einen hohen Nutzen und stellen eine bedeutende Innovation im Bereich der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung dar.

Im wissenschaftlich-technischen Sinne wurde durch die Kombination EBM (LMM-HHT-E zur Langzeitanalyse und der NIOSH-Hebegleichung zur kurzfristigen Risikobewertung) mit modernen Technologien der Bildverarbeitung ein neuartiges System zur automatisierten Ergonomiebewertung geschaffen. Die automatische Erfassung und Bewertung von Körperhaltungen, Bewegungsabläufen und Belastungssituationen erfolgt auf Basis handelsüblicher Kamerasysteme und marktverfügbarer Hardware wie Smartphones mit integrierten Tiefensensoren. Dadurch entfallen kostenintensive Sensorlösungen oder aufwendige markerbasierte Motion-Capturing-Systeme. Besonders hervorzuheben ist die Quasi-Echtzeitfähigkeit des entwickelten Systems, die es erlaubt, während der Ausführung von Arbeitsaufgaben ergonomisch kritische Bewegungen zu erkennen und sofort Rückmeldung zu geben. Gleichzeitig können die Daten langfristig dokumentiert und für strategische Arbeitsplatzanalysen verwendet werden. Die entwickelte grafische Benutzeroberfläche ermöglicht eine einfache und intuitive Anwendung ohne spezielles Fachwissen, was die praktische Nutzbarkeit in KMU deutlich erhöht.

Auch aus wirtschaftlicher Sicht ergeben sich erhebliche Vorteile für KMU. Diese verfügen häufig weder über die personellen Ressourcen noch über das Budget, um externe Fachkräfte für ergonomische Analysen zu beauftragen oder teure kommerzielle Systeme einzusetzen. Das im Projekt entwickelte System bietet eine kosteneffiziente und dennoch präzise Lösung, mit der Unternehmen ihre Arbeitsplätze selbstständig bewerten und verbessern können. Die automatisierte Analyse hilft, gesundheitliche Risiken frühzeitig zu erkennen und gezielte präventive Maßnahmen abzuleiten, was zur Reduktion krankheitsbedingter Ausfälle und zur Verbesserung der Produktivität beiträgt. Zudem lassen sich ergonomische Verbesserungen nun objektiv nachweisen, was die Rechtfertigung ergonomischer Investitionen erleichtert. Durch die flexible technische Umsetzung ist das System sowohl für einfache Arbeitsplätze als auch für komplexere industrielle Umgebungen einsetzbar.

Der innovative Charakter des Projekts zeigt sich vor allem in der einzigartigen Verbindung wissenschaftlich fundierter Ergonomiemethoden mit aktueller KI-gestützter Bildverarbeitung. Die Möglichkeit, entweder mit realen Videodaten oder abstrahierten Skelettdarstellungen zu arbeiten, gewährleistet zusätzlich die Wahrung der Persönlichkeitsrechte und fördert die Akzeptanz in der Belegschaft.

In der industriellen Anwendung eröffnet das System vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Es kann zur präventiven Arbeitsplatzgestaltung bereits in der Planungsphase neuer Arbeitsplätze genutzt werden, in der laufenden Produktion zur Identifikation ergonomischer Schwachstellen beitragen oder als Schulungsinstrument dienen, um Mitarbeitende für gesundes Arbeiten zu sensibilisieren. Insbesondere KMU, die regelmäßig neue Arbeitsplätze einrichten oder bestehende Prozesse verbessern möchten, profitieren von einem schnellen, skalierbaren und einfach bedienbaren System, das ohne tiefes Expertenwissen eingesetzt werden kann. Damit leistet AkEvAp einen wichtigen Beitrag zur langfristigen Gesunderhaltung von Beschäftigten, zur Effizienzsteigerung in KMU und zur Verbreitung innovativer, digital gestützter Ergonomiekonzepte in der industriellen Praxis.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der Wissenstransfer in die Wirtschaft erfolgte im Rahmen des Projekts AkEvAp auf mehreren Ebenen: Zum einen wurden die Ergebnisse regelmäßig im Projektbegleitenden Ausschuss mit Vertreterinnen und Vertretern aus der Praxis diskutiert und weiterentwickelt. Zum anderen wurden die entwickelten Methoden und der Software-Demonstrator bei einem Logistikunternehmen unter Realbedingungen getestet und evaluiert. Darüber hinaus wurden zentrale Erkenntnisse über Online-Plattformen sowie Print- und Webveröffentlichungen einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Der entwickelte Quellcode wurde auf GitHub veröffentlicht, um interessierten Unternehmen einen direkten Zugang zur Technologie zu ermöglichen und den Transfer in weitere Anwendungen zu fördern.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Tim Stratmann – Selbstständiger Sportwissenschaftler • WISTRO Elektro-Mechanik GmbH • Georg Ebeling Spedition GmbH 	03.11.2023 18.12.2023 07.01.2025
Information der Unternehmen des PA	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegungen, Abstimmung, Erfahrungsaustausch innerhalb des PA	<ul style="list-style-type: none"> • Erstes Treffen des PA • Zweites Treffen des PA • Drittes Treffen des PA • Viertes Treffen des PA 	19.01.2023 27.02.2024 03.09.2024 25.01.2025
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Ergebnistransfer in die Öffentlichkeit	Einrichtung einer Projektseite, Pressemitteilungen, soziale Medien https://akevap.iph-hannover.de	kontinuierlich
Personaltransfer	Durchführung von Praktika und Abschlussarbeiten <ul style="list-style-type: none"> • Bachelorarbeit (BA) • Studienarbeit (SA) • Masterarbeit (MA) • Praktikum (Pr) 	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluating existing methods of ergonomic assessment of warehouse workers regarding their automation feasibility and long-term viability (BA) • Gestenerkennung mit mobilen Geräten (SA) • Recognition of Guitar Chords through Hand Pose Estimation (BA) • Evaluation verschiedener Methoden zur Datenaugmentierung für die Klassifikation multivariater Zeitreihen (BA) 	02.01.2023 - 02.07.2023 03.05.2023 - 21.11.2023 30.11.2023 - 02.04.2024 01.08.2024 - 03.02.2025

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Wissenschaftliche Publikationen/ Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Nationaler Ergebnistransfer	Publikationen in Magazinen: <ul style="list-style-type: none"> Artikel in Technik und Leben, VDI Verein deutscher Ingenieure, „Neuigkeiten vom Kommissionierarbeitsplatz“ 	Sommer 2023

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Ergebnistransfer in die Öffentlichkeit	Einrichtung einer Projektseite, Pressemitteilungen, soziale Medien (LinkedIn, Xing, Facebook Instagram, Twitter, YouTube)	Bis Q3 2025
Wissenschaftliche Publikation in (inter-)nationalen Fachzeitschriften	Nationaler und internationaler Ergebnistransfer	<ul style="list-style-type: none"> IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 	Ab Q3/Q4 2025
Präsentationen auf Konferenzen, Tagungen, Messen	Nationaler und internationaler Ergebnistransfer	<ul style="list-style-type: none"> GfA-Frühjahrskongress 	Q1 2026
Vorträge, Dialoggespräche	Multiplikatorwirkung, Verteilung des Softwaredemonstrators an KMU	Kostenlose Angebote im Rahmen des Mittelstand Digital Zentrums für KMU	kontinuierlich
Veröffentlichung Quellcode, Datensatz	Ergebnistransfer, Synergieentwicklung, Entwicklung von Dienstleistung, Förderung freier Wissenschaft	Github.com	Kontinuierliche Pflege

8 Literaturverzeichnis

- [Bau25] BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Gefährdungsbeurteilung mit den Leitmerkmalmethoden. <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung/Gefaehrdungsbeurteilung/Leitmerkmalmethode> [Zugriff am 21.02.2025]
- [Nio94] NIOSH [1994]. Applications manual for the revised NIOSH lifting equation. Waters TR, Ph.D., Putz–Anderson V, Ph.D., Garg A, Ph.D. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National

Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 94-110
(Revised 9/2021)

- [Tka20] M. Tkachenko, M. Malyuk, A. Holmanyuk, N. Liubimov. Label Studio: Data labeling software, 2020. Open source software available from <https://github.com/Human-Signal/label-studio>
- [He16] K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: CVPR, 2016.
- [Ren15] S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. In: NIPS, 2015.
- [Sha20] D. Shan, J. Geng, M. Shu, D. F. Fouhey. Understanding Human Hands in Contact at Internet Scale. In: CVPR, 2020.
- [Wan24] Y. Wang, Z. Wang, L. Liu, K. Daniilidis. TRAM: Global Trajectory and Motion of 3D Humans from in-the-Wild Videos. In: ECCV, 2024.
- [Lop15] M. Loper, N. Mahmood, J. Romero, G. Pons-Moll, M. J. Black. SMPL: a skinned multi-person linear model. In: TOG, 2015.