

Schlussbericht vom 12.09.2025

zum IGF-Vorhaben Nr. 22591 N

Thema

Tracking von Bewegungsabläufen zur daten- und modellbasierten Identifikation von Verbesserungspotenzialen im Cardboard Engineering

Berichtszeitraum

01.02.2023 - 31.05.2025

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)

Schlachte 31

28195 Bremen

Forschungseinrichtung

Technische Universität Hamburg, Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT)

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	3
1 Kurzfassung	4
2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	6
2.1 AP 1 Anforderungsanalyse (2 PM)	6
2.2 AP 2 Grobentwicklung von Methoden zur Produktivitäts- und Ergonomieanalyse (9 PM).....	7
AP 3 Feinentwicklung der Methoden im Digitalen Assistenzsystem (10 PM).....	17
AP 4: Entwicklung des CE-Workshops (2 PM)	24
AP 5: Evaluierung am Praxisbeispiel (1 PM)	26
3 Verwendung der Zuwendung	28
4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	28
5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	28
6 Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	29
7 Durchgeführte Transfermaßnahmen	30
8 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	31
9 Literaturverzeichnis	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung eines Arbeitsvorgangs im Digitalen Assistenzsystem	8
Abbildung 2: Detailebenen im Digitalen Assistenzsystem	8
Abbildung 3: Detaillierung der Arbeitsvorgänge	10
Abbildung 4: Aufbereitung der Bewegungsdaten	10
Abbildung 5: IPMT-Softwareplattform	16
Abbildung 6: Validierung der MTM-1-Analyse	17
Abbildung 7: Gauge-Chart	19
Abbildung 8: Greifraum der linken Körperhälfte	19
Abbildung 9: Gesamtübersicht der Ergebnisse	20
Abbildung 10: Auswertung der Ergonomieanalyse	20
Abbildung 11: Auswertung der Produktivitätsanalysen	21
Abbildung 12: Vergleich von Produktivität und Ergonomie	21
Abbildung 13: Ergonomie und Produktivität im Zeitverlauf	22
Abbildung 14: Ergebnisse des Optimierungsprozesses	23
Abbildung 15: PDCA-Zyklus	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktivitätsanalysen	9
Tabelle 2: Ergonomieanalysen	12
Tabelle 3: Ergonomie- und Produktivitätskennzahlen	14
Tabelle 4: Darstellung der Kennzahlen im Assistenzsystem	15
Tabelle 5: Abweichung zwischen den Risikokategorien	16
Tabelle 6: Schritte zur Vorbereitung und Durchführung der Analysen	25
Tabelle 7: Durchgeführte Transfermaßnahmen	30
Tabelle 8: Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	31

1 Kurzfassung

Zwischen 2007 und 2023 stieg die durchschnittliche jährliche Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigenstunde nur um 0,7 % (Deutsche Bundesbank 2025). Gerade in produzierenden Unternehmen mit einem hohen Anteil an manueller Arbeit können unzureichende Arbeitsabläufe zu Produktivitätsverlusten, z. B. durch unnötige Bewegungen, oder zu Muskel-Skelett-Erkrankungen durch Überbelastung führen. Dies bestätigt eine Studie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) aus dem Jahr 2022: Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems und des Bindegewebes sind im produzierenden Gewerbe für 21,7 % der Arbeitsunfähigkeitstage in Deutschland verantwortlich (BAuA 2023).

Um die Produktivität zu steigern, sollten Unternehmen ihre Arbeitsabläufe ergonomisch und wirtschaftlich gestalten. Dazu müssen die Arbeitsabläufe zunächst analysiert werden, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Hierfür können Produktivitätsanalysen wie z. B. das Methods-Time Measurement (MTM)-Verfahren oder Primär-Sekundär-Analysen eingesetzt werden, um effiziente und verschwendungsreie Arbeitsprozesse zu gestalten (Bokranz und Landau 2012) . Ergonomieanalysen wie die RULA-Methode können dagegen genutzt werden, um Belastungen am Arbeitsplatz zu bewerten und zu reduzieren und somit die Arbeit mitarbeitergerecht zu gestalten.

Traditionell analysieren Industrial Engineers die Arbeitsabläufe in Unternehmen. Dies ist oft nur in begrenztem Umfang möglich, da die Analysen sehr zeitaufwendig sein können und teilweise Expertenwissen erfordern. In der Praxis benötigt ein MTM-Experte nach Angaben der MTM ASSOCIATION e. V. etwa fünf Stunden, um eine einminütige Bewegungssequenz mit dem MTM-1®-Verfahren vollständig zu analysieren (Pöttker et al. 2025a). Ein weiteres Problem ist, dass Analysen oftmals erst nach dem Produktionshochlauf erfolgen. Dadurch sind die Fehlerbeseitigungskosten deutlich höher, als wenn die entsprechenden Maßnahmen bereits bei der Arbeitsplatz- und Prozessgestaltung umgesetzt würden (Dombrowski 2015). Hinzu kommen indirekte Kosten, wenn ein Mitarbeiter aufgrund falscher Arbeitsbelastung ausfällt oder in seiner Leistungsfähigkeit kurzfristig oder sogar dauerhaft eingeschränkt ist (Institut für Arbeitswissenschaft 2010). Darüber hinaus besteht das generelle Problem, dass die Mitarbeitenden zu wenig in die Durchführung der Analysen und in den Verbesserungsprozess eingebunden werden. Dadurch sinkt die Akzeptanz der durchgeführten Maßnahmen und das implizite Wissen der Mitarbeitenden über mögliche Verbesserungsmaßnahmen bleibt ungenutzt (Gorecki und Pautsch 2024).

Im Forschungsprojekt wurde ein Digitales Assistenzsystem entwickelt, das mit einem Motion-Capture-System (MoCap-System) die schnelle, detaillierte und produktsspezifische Durchführung von Produktivitäts- und Ergonomieanalysen ermöglicht. Während das MoCap-System Bewegungen erfasst, dient das Digitale Assistenzsystem dazu, zusätzliche Metadaten aufzunehmen, unterschiedliche Analysen mithilfe der Bewegungsdaten durchzuführen und die Analyseergebnisse zu visualisieren. Eingesetzt werden kann das Digitale Assistenzsystem sowohl bei laufender Produktion als auch in früheren Planungsphasen, wie z. B. in Cardboard Engineering-Workshops (CE-Workshops). In diesen CE-Workshops werden Tätigkeiten, Abläufe und Anordnungen von Arbeitssystemen mithilfe leicht verfügbarer und günstiger Materialien gemeinsam mit den Mitarbeitenden physisch simuliert. Dabei wird das implizite Mitarbeiterwissen in die Gestaltung der Arbeitsplätze und Prozesse integriert (Schuh et al. 2010; Dombrowski 2015). Das Digitale Assistenzsystem wurde bei mehreren Forschungseinrichtungen validiert und sowohl in der Industrie bei laufender Produktion als auch in der Modelfabrik des Instituts für Produktionsmanagement und -technik evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Analysen valide sind und Unternehmen dabei unterstützen können, mit deutlich

reduziertem Zeitaufwand ergonomische und zeitlich optimierte Arbeitsabläufe zu gestalten sowie die Dokumentationsqualität zu verbessern.

Der Schlussbericht ist wie folgt gegliedert: Abschnitt 2 beschreibt die in den Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse, Abschnitt 3 die Verwendung der Zuwendung, Abschnitt 4 die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, Abschnitt 5 die Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten, Abschnitt 6 den Wissenstransfer in die Wirtschaft, Abschnitt 7 die durchgeführten Transfermaßnahmen und Abschnitt 8 die geplanten spezifischen Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Dieser Abschnitt beschreibt die Ziele, die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse pro Arbeitspaket (Abschnitte 2.1 - 2.6).

2.1 AP 1 Anforderungsanalyse (2 PM)

Ziele und Arbeitsprogramm

Ziel von AP 1 war es, die Anforderungen an die Ergonomie- und Produktivitätsanalysen zu definieren, die mit dem Digitalen Assistenzsystem in den CE-Workshops durchgeführt werden sollen. Hierzu sollten die Anforderungen an die Analysemethoden (AP 1.1) und die Anforderungen aus dem CE definiert werden (AP 1.2).

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse der AP 1.1 und AP 1.2 beschrieben.

AP 1.1 Anforderungen an die Analysemethoden (1 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Zu Beginn des Projekts wurde eine umfassende Literaturrecherche zu bestehenden Ergonomie- und Produktivitätsanalysen durchgeführt. Weiterhin wurden die mit dem MoCap-System erfassbaren Daten analysiert. Es wurde untersucht, inwieweit sich die Analysemethoden mit den Daten des MoCap-Systems automatisieren lassen, um den manuellen Aufwand für die Eingabe zusätzlicher Metadaten zu reduzieren. Um die Auswahl möglicher Methoden einzuschränken, wurden die Arbeitsabläufe in zwei Unternehmen analysiert.

Ergebnisse: Das zu entwickelnde digitale Assistenzsystem wird für die Mengenfertigung konzipiert, da in beiden Unternehmen ein Arbeitsplatz dieses Fertigungstyps identifiziert wurde, der Verbesserungspotenziale hinsichtlich Ergonomie und Produktivität aufweist. Zudem kann bei diesem Fertigungstyp das volle Potential des MoCap-Systems ausgeschöpft werden, da hier besonders detaillierte Analysen zum Einsatz kommen.

Die Arbeitsabläufe in der Mengenfertigung führen häufig zu physischen Belastungen durch repetitive Tätigkeiten und unergonomische Körperhaltungen der Mitarbeitenden (Daub et al. 2018). Der Informationsbedarf der Workshop-Teilnehmenden soll daher durch eine Kennzeichnung überbeanspruchter Körperregionen in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastungsart gedeckt werden. Mithilfe einer Risikoskala in Form eines Ampelschemas sollen die Ergebnisse auch ohne ergonomisches Fachwissen interpretierbar sein.

Durch die Produktivitätsanalysen sollen Vorgabezeiten bestimmt und Verschwendungen identifiziert werden. Das Assistenzsystem soll dem Anwender beispielsweise Arbeitsvorgänge mit hoher Verschwendungsrate oder signifikanten Soll-Ist-Zeiten-Abweichungen visualisieren. So lassen sich iterativ effiziente, verschwendungsarme Arbeitsprozesse gestalten.

Die Ergebnisse der Ergonomie- und Produktivitätsanalysen sollen einzelnen Prozessschritten zugeordnet werden können, um Verbesserungspotenziale gezielt zu identifizieren. Bei der Auswahl geeigneter Analyseverfahren ist dies zu beachten, da viele Ergonomieanalysen beispielsweise einen Risikowert für den gesamten Arbeitsablauf ermitteln und daher keine Zuordnung einzelner (Teil-)Risikowerte zu den Prozessschritten erlauben.

AP 1.2 Anforderungen aus dem Cardboard Engineering (1 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Zunächst wurde eine Literaturrecherche zum CE durchgeführt. Dabei wurden aktuelle Praxisstudien analysiert, in denen CE-Workshops eingesetzt wurden, um Arbeitsplätze und -prozesse zu gestalten und zu verbessern.

Ergebnisse: Ziel von CE-Workshops ist es, in kurzzyklischen Verbesserungsschleifen den Arbeitsplatz ergonomisch und produktiv optimal zu gestalten (Schuh et al. 2010). Dazu wurden folgende Anforderungen abgeleitet:

- Die Analysemethoden sollen mit den MoCap-Daten weitgehend automatisiert werden können, um den manuellen Aufwand zur Erfassung von Metadaten zu reduzieren.
- Die Analyseergebnisse sollen zeitnah bereitstehen, sodass schnell Anpassungen vorgenommen werden können.
- Die Analyseergebnisse und der Fortschritt zwischen den Verbesserungszyklen sollen dokumentiert, anschaulich visualisiert und über eine benutzerfreundliche Zugriffslogik leicht aufrufbar sein.

2.2 AP 2 Grobentwicklung von Methoden zur Produktivitäts- und Ergonomieanalyse (9 PM)

Ziele und Arbeitsprogramm

Ziel von AP 2 war es, Analysemethoden für CE-Workshops (weiter-)zu entwickeln. Dabei sollte beachtet werden, dass die Analysen in Echtzeit durchgeführt und die Ergebnisse automatisch bestimmten Bewegungen und Abläufen zugeordnet werden können. In einem ersten Schritt sollte ein Vorgehen entwickelt werden, um einen Arbeitsablauf gemäß der MTM-Logik in mehrere Detailebenen unterteilen zu können (AP 2.1). In einem zweiten und dritten Schritt sollten Methoden zur Produktivitäts- und Ergonomieanalyse für die verschiedenen Detailebenen entwickelt werden (AP 2.2 und AP 2.3). Der vierte Schritt hatte zum Ziel, ein Konzept für die Darstellung der Analyseergebnisse zu erarbeiten (AP 2.4). Abschließend sollten in einem fünften Schritt die Teilfunktionen und -module evaluiert werden (AP 2.5).

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse der AP 2.1 bis AP 2.5 beschrieben.

AP 2.1 Unterteilung des Arbeitsablaufs (1 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Im Digitalen Assistenzsystem wurde ein Vorgehen implementiert, das es ermöglicht, den Arbeitsablauf unter Verwendung der Stückliste und der Bewegungsdaten in Arbeitsvorgänge und Bewegungselemente aufzuteilen.

Ergebnisse: Das Digitale Assistenzsystem ermöglicht es dem Anwender, für jedes Produkt einen Arbeitsplan und eine Stückliste anzulegen. Ein Arbeitsplan ist unterteilt in Arbeitsvorgänge, die dynamisch aus der Stückliste generiert werden. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel eines Arbeitsvorgangs im Digitalen Assistenzsystem.

Arbeitsvorgang 1					
Arbeitsvorgang Gehäusedeckel auflegen	Arbeitsplatz 1	Material (MN.) (Anzahl) Komponente Gehäusedeckel (37123) (1)	Betriebsmittel (BN.) Maulschlüssel (275)	Mitarbeiter (PN.) Silas Pöttker (276)	Modul/Produkt Ref. (Level) Produkt Getriebe (1)

Abbildung 1: Darstellung eines Arbeitsvorgangs im Digitalen Assistenzsystem

Jeder Arbeitsvorgang ist mit einem Material aus der Stückliste verknüpft, das während des Arbeitsvorgangs montiert wird. Weiterhin können dem Arbeitsvorgang ein Arbeitsplatz, ein Mitarbeiter sowie die zur Durchführung benötigten Betriebsmittel zugeordnet werden. Um eine detaillierte Analyse zu ermöglichen, werden die Arbeitsvorgänge weiter unterteilt. Hierfür wird das MTM-1-Verfahren verwendet, welches einen Arbeitsvorgang in Bewegungselemente gliedert. Abbildung 2 zeigt alle Detailebenen des digitalen Assistenzsystems, um die Analyseergebnisse auszuwerten.

Ebene

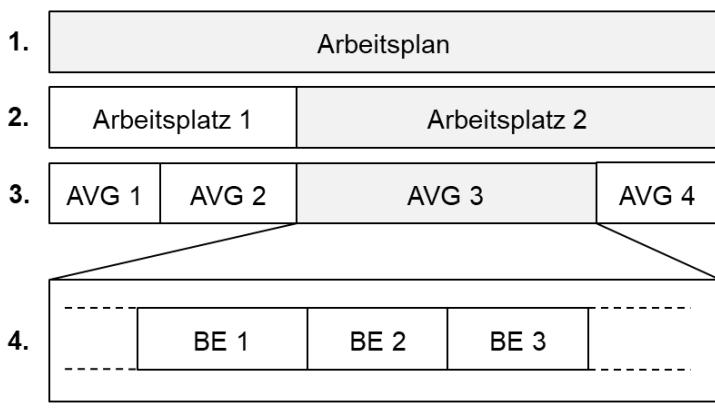


Abbildung 2: Detailebenen im Digitalen Assistenzsystem

Wie Abbildung 2 zeigt, ist es möglich, die Analyseergebnisse auf Arbeitsvorgangsebene zu aggregieren, um Kennzahlen auf der Arbeitsplatzebene und der Arbeitsplanebene zu erhalten. Insgesamt ermöglicht es diese Struktur, Ergebnisse aus Produktivitäts- und Ergonomieanalysen auf verschiedenen Detailebenen zu analysieren.

AP 2.2 Grobentwicklung von Methoden zur Produktivitätsanalyse (3 PM)

Durchgeführte Arbeiten: In einem ersten Schritt wurde analysiert, welche etablierten Produktivitätsanalysen sich mit den Bewegungsdaten des MoCap-Systems (teil-)automatisiert durchführen lassen. In einem zweiten Schritt wurden die ausgewählten Analysen im Digitale Assistenzsystem implementiert.

Hinweis: Das Arbeitspaket wurde in enger Zusammenarbeit mit der MTM ASSOCIATION e. V. bearbeitet. Dank der MTM ASSOCIATION war es möglich, bestehende Ansätze zu erweitern, sodass vollständige MTM-Analysen erstellt werden können.

Ergebnisse: Insgesamt wurden vier Produktivitätsanalysen ausgewählt: MTM-1-Analyse, Primär-Sekundär-Analyse (PSA), Soll-/Ist-Zeiten-Vergleich und Line Balancing. Die Tabelle 1 zeigt, auf welchen Detailebenen die Ergebnisse verschiedener Produktivitätsanalysen analysiert werden können.

Tabelle 1: Produktivitätsanalysen

Produktivitätsanalyse	Ebenen
MTM-1-Analyse	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz-, Arbeitsvorgangs- und Bewegungselementebene
Primär-Sekundär-Analyse	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz-, Arbeitsvorgangs- und Bewegungselementebene
Soll-/Ist-Zeiten-Vergleich	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz- und Arbeitsvorgangsebene
Line Balancing	Arbeitsvorgangsebene

Im Folgenden erfolgt eine detailliertere Beschreibung der Analysen.

MTM-1-Analyse: Die MTM-1-Analyse wird verwendet, um Vorgabezeiten (genauer Grundzeiten) für Prozessbausteine zu ermitteln, die Arbeitsprozesse abbilden (Bokranz und Landau 2012). Ein Arbeitsvorgang setzt sich aus Prozessbausteinen zusammen, die im Folgenden als Bewegungselemente bezeichnet werden. Somit ermöglicht es die MTM-1-Methodik, Arbeitsvorgänge in Bewegungselemente zu detaillieren (vgl. Abbildung 2). Sie liefert darüber hinaus die Datengrundlage für die Durchführung der PSA sowie für den Soll-/Ist-Zeiten-Vergleich. Um eine MTM-1-Analyse aus den Bewegungsdaten erzeugen zu können, wurde das Tool MTMmotion der MTM ASSOCIATION verwendet.

Ziel der Entwicklung von MTMmotion war es, für alle Technologien, die menschliche Bewegungsdaten erzeugen oder verarbeiten, valide MTM-Analysen abzuleiten (Kuhlang et al. 2023a; Benter und Neumann 2023). MTMmotion verwendet einen Übersetzungsalgorithmus, der die über eine Schnittstelle übertragenen Bewegungsdaten in MTM-Analysen übersetzen kann (Benter und Neumann 2023). Die Schnittstelle von MTMmotion besteht aus einer Objektliste und sechs Kanälen, die Bewegungsabläufe abbilden. Für die Beschreibung eines Arbeitsablaufs ist es insbesondere erforderlich, die Armbewegungen zu erfassen und mit den Objekten zu verknüpfen. Im Folgenden wird anhand der Armbewegungen erläutert (Kanal 2), wie die Daten mit der MoCap-Methode erzeugt werden (Pöttker et al. 2025b).

Für die Armbewegungen müssen verschiedene Einflussgrößen angegeben werden, wie bspw. das zu handhabende Objekt (ObjectID aus der Objektliste), die Start- und Endzeit der Bewegung sowie spezifische Einflussgrößen (z. B. Distanz, Greifart, Bereitstellung, Kraft), um den Arbeitsablauf genauer zu beschreiben. Fehlen diese Angaben, werden dafür Standardwerte hinterlegt (Kuhlang et al. 2023b). Für die MoCap-Methode werden diese Daten wie folgt ermittelt:

1. Detaillierung der Arbeitsvorgänge: Um die erfassten Bewegungen Objekten zuordnen zu können, muss der Prozessablauf bekannt sein. Eine erste Idee war, die absoluten Positionen von Objekten wie Materialien und Betriebsmitteln zu hinterlegen. Aufgrund der starken Drift in den Positionsdaten der Sensoren des MoCap-Systems, konnte diese Idee nicht realisiert werden. Daher muss der Anwender die Reihenfolge der Objekte (Material und Betriebsmittel) und der Fügeoperationen in den Arbeitsvorgängen manuell angeben, wie Abbildung 3 zeigt.

Produkt
Getriebe

Version
1

< 1 >

Arbeitsvorgang 1

Beschreibung
Gehäusedeckel auflegen

Elemente

Material Komponente Gehäusedeckel (37123) (0)

Betriebsmittel Maulschlüssel (275)

+

Handbewegungen

1. Material Komponente Gehäusedeckel (37123) (1)

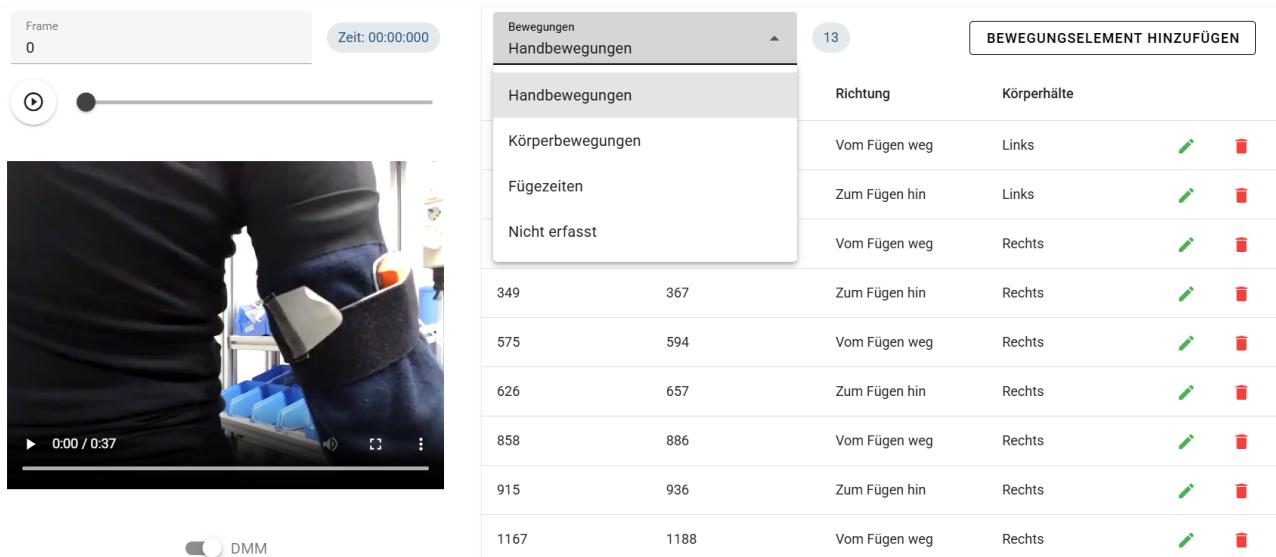
2. Fügen Komponente Gehäusedeckel (37123) aufstecken (7) x (1) x (1)

█ ✓

Abbildung 3: Detaillierung der Arbeitsvorgänge

Die Elemente in Abbildung 3 stammen aus dem Arbeitsplan. Sie können per Drag-and-Drop in eine Reihenfolge gebracht werden (siehe Feld „Handbewegungen“ in Abbildung 3). Einige Metadaten, wie Abmaße, Gewichte oder die Objekte-ID aus der Objektliste von MTMmotion, sind den Objekten bereits hinterlegt, da sie beim Anlegen der Stückliste erfasst wurden. Andere Metadaten wie z. B. die Anzahl der zu handhabenden Objekte können den Objekten nach dem Drop zugewiesen werden, da hier ein objektspezifisches Eingabefeld mit den benötigten Informationen erscheint.

2. Aufbereitung der Bewegungsdaten: Das MoCap-System berechnet die Hand- und Körperbewegungen mit den Start- und Endzeiten und Bewegungslängen und ordnet sie automatisch den Objekten aus den Arbeitsvorgängen zu. Wenn dabei Fehler auftreten, muss der Anwender die Zuordnung korrigieren. Dabei kann der Anwender durch ein Video oder ein digitales Menschmodell (DMM) unterstützt werden. Abbildung 4 zeigt das Vorgehen, um die Bewegungsdaten aufzubereiten.



Bewegungen		Richtung	Körperhäle	BEWEGUNGELEMENT HINZUFÜGEN	
Handbewegungen				13	
Handbewegungen				█	█
Körperbewegungen		Vom Fügen weg	Links	█	█
Fügezeiten		Zum Fügen hin	Links	█	█
Nicht erfasst		Vom Fügen weg	Rechts	█	█
349	367	Zum Fügen hin	Rechts	█	█
575	594	Vom Fügen weg	Rechts	█	█
626	657	Zum Fügen hin	Rechts	█	█
858	886	Vom Fügen weg	Rechts	█	█
915	936	Zum Fügen hin	Rechts	█	█
1167	1188	Vom Fügen weg	Rechts	█	█

Abbildung 4: Aufbereitung der Bewegungsdaten

Mit diesen zwei Schritten werden die Schnittstellendaten für MTMmotion® erzeugt, das mithilfe eines Übersetzungsalgorithmus eine MTM-1-Analyse erstellt und zurückgibt. Für alle Prozessbausteine sind TMU-

Werte angegeben, wobei 1 TMU 0,0036 s sind. Dadurch können die Vorgabezeiten (genauer Grundzeiten) sowohl für einzelne Bewegungselemente, Arbeitsvorgänge und Arbeitsplätze als auch für den gesamten Arbeitsablauf errechnet werden. Weiterhin bildet die MTM-1-Analyse die Grundlage für die PSA.

Primär-Sekundär-Analyse: Die PSA unterteilt die Handhabungs- und Fügevorgänge anhand der MTM-Bewegungen in Primär- und Sekundärvorgänge. Primärvorgänge sind alle wertschöpfenden Montagetätigkeiten zur Fertigstellung eines Produktes, während Sekundärvorgänge alle auf Grund des gewählten Montageprinzips notwendigen Aufwendungen an Zeit, Energie und Informationen ohne eine Wertschöpfung des Produktes sind. Die Wirtschaftlichkeit ist die Summe der Dauern aller Primärvorgänge im Verhältnis zur Summe der Dauern aller Primär- und Sekundärvorgänge. Dieser Wirkungsgrad erlaubt eine nachvollziehbare Aussage über die Effizienz eines Montageplatzes, einer Montagestation oder eines Montagesystems. Die wichtigsten Optimierungs- und Rationalisierungsmaßnahmen zielen darauf ab, Sekundärvorgänge zu reduzieren (Lotter und Wiendahl 2012). In Anlehnung an Lotter wird bei der Implementierung der PSA angenommen, dass alle Bewegungen und Fügeoperationen, mit Ausnahme der Hinlang- und Bringbewegungen sowie der Körperbewegungen, wertschöpfend sind. Die Hinlang- und Bringbewegungen werden für jeden Arbeitsplatz in Primär- und Sekundäraufwände unterteilt. Die kürzeste Hinlang- oder Bringbewegung an einem Arbeitsplatz stellt den Grenzwert für den Primäraufwand dar (gemessen in TMU). Alle Aufwände oberhalb dieses Grenzwertes sind Sekundäraufwände. Dadurch lässt sich für jede Detailebene der Primär- und Sekundäraufwand berechnen.

Line Balancing: Mithilfe der MoCap-Daten und den Bewegungselementen lassen sich die Start- und Endzeitpunkte und somit die Dauern einzelner Arbeitsvorgänge bestimmen. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für das Line Balancing. Mit dieser Methode können Engpasssysteme innerhalb von Montagelinien optimiert werden. Engpässe beschränken den Gesamtdurchsatz des Arbeitssystems und wirken sich somit negativ auf die Produktivität der übrigen Arbeitsplätze aus. Ziel des Line Balancing ist es, sämtliche Prozesse an der Kundennachfrage und somit am Kundentakt auszurichten. Dazu wird zunächst die erforderliche Anzahl an Arbeitsplätzen bestimmt. Anschließend werden die Arbeitsvorgänge auf die Arbeitsplätze verteilt. Dabei wird darauf geachtet, dass die Arbeitsinhalte möglichst gleichmäßig verteilt sind und sich an der vorgegebenen Taktzeit orientieren (Niemann 2021). Das Assistenzsystem ermöglicht es, die Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitsvorgänge im Arbeitsplan per Drag-and-Drop zu ändern und ihnen manuell Arbeitsplätze zuzuweisen. Da jedes Material mit einem Arbeitsvorgang verknüpft ist, ist die Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitsvorgänge durch die Produktstruktur vorgegeben. Dem Anwender wird im Assistenzsystem die Ebene des Materials in der Produktstruktur visualisiert, wodurch die korrekte Bearbeitungsreihenfolge eingehalten wird.

AP 2.3: Grobentwicklung von Methoden zur Ergonomieanalyse (3 PM)

Durchgeführte Arbeiten: In einem ersten Schritt wurde analysiert, welche Belastungsarten in der Mengenfertigung auftreten und mit welchen Ergonomieanalysen sich diese bewerten lassen. In einem zweiten Schritt wurde untersucht, welche dieser Analysen sich mit den Bewegungsdaten des MoCap-Systems automatisiert durchführen lassen, um das erforderliche ergonomische Expertenwissen auf ein Minimum zu reduzieren. In einem dritten Schritt wurden die ausgewählten Analysen in das Digitale Assistenzsystem implementiert.

Hinweis: Das Arbeitspaket wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitsschutz (IFA) der DGUV bearbeitet.

Ergebnisse: Es gibt vier Belastungsarten: manuelle Lasthandhabungen, Körperhaltung, Aktionskräfte und repetitive Tätigkeiten (Institut für Arbeitswissenschaft 2010). Bei stark standardisierten Arbeitsplätzen, wie sie oftmals in der Massenfertigung vorkommen, liegen vor allem repetitions- und haltungsbedingte Belastungen vor (Daub et al. 2018). Aus diesem Grund sollen Analysen zur Bewertung repetitiver Haltungen und Körperhaltungen durchgeführt werden. Generell lassen Ergonomieanalysen in Grob-Screening-Verfahren, Screening-Verfahren, Detail-Expertenverfahren und Messverfahren unterteilen, die sich in ihrem Beurteilungsniveau unterscheiden. Während Messverfahren die Risikofaktoren sehr detailliert erfassen, geben Grob-Screening-Verfahren nur Hinweise auf mögliche Risiken (Institut für Arbeitswissenschaft 2010). Da das eingesetzte MoCap-Systems Daten wie Gelenkwinkel und -geschwindigkeiten mit einer hohen Abtastrate misst, wurden messtechnischen Analysen ausgewählt, die in Tabelle 2 aufgeführt sind.

Tabelle 2: Ergonomieanalysen

Ergonomieanalysen	Ebene(n)
Messung der Gelenkwinkel	---
Greifraumanalyse	---
Messtechnische Analyse der DGUV zur Bewertung ungünstiger Körperhaltungen und -bewegungen	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz-, Arbeitsvorgangs- und Bewegungselementebene

In Echtzeit durchführbar

Hierbei kann zwischen Echtzeit- und nachgelagerten Ergonomieanalysen unterschieden werden. Echtzeitfähige Analysen ermöglichen es dem Anwender, direktes Feedback zu erhalten, um unmittelbar Verbesserungen in der Arbeitsplatz- und Prozessgestaltung vornehmen zu können. Die Ergebnisse sind nachträglich keiner der Analyseebenen zuordenbar, da sie in Echtzeit dargestellt und nicht gespeichert werden. Hingegen können die Ergebnisse der nachgelagerten messtechnischen Analyse der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) den einzelnen Prozessschritten zugeordnet werden (vgl. Abbildung 2). Ein Vorteil der Analysen in Tabelle 2 ist, dass die Ergebnisse mit wenig ergonomischem Wissen ausgewertet werden können. Im Folgenden werden die Analysen detaillierter beschrieben.

Messung der Gelenkwinkel: Ziel dieser Analyse ist es, ungünstige Körperhaltungen in Echtzeit zu identifizieren. Dazu werden die gemessenen Gelenkwinkel mit den von der DGUV angegebenen Winkelbereichen verschiedener Körperteile verglichen. Diese umfassen die Winkelbereiche für Kopf, Rumpf sowie obere und untere Extremitäten in neutraler, mittelgradiger und endgradiger Stellung. In Anlehnung an die DGUV sind die Winkelbereiche nach dem Ampelschema kategorisiert. Die neutralen Winkel sind grün, die mittelgradigen gelb und die endgradigen rot. Im Assistenzsystem wird dem Anwender in Echtzeit farblich visualisiert, in welchem Bereich der gemessene Winkel liegt. Darüber hinaus bietet das Assistenzsystem die Funktion, aufzuzeichnen, wie viel Prozent der Zeit sich jedes Körperteil im nicht akzeptablen Bereich befindet (Pöttker und Lödding 2024). So können die Gelenke identifiziert werden, die bei der Arbeitsaufgabe am stärksten belastet werden. Bei der Messung der Gelenkwinkel ist zu beachten, dass die Kategorisierung ohne Berücksichtigung von Parametern wie Dauer, Häufigkeit, Dynamik von Bewegungen bzw. Statik von Haltungen und äußeren Umständen (z. B. abgestützte Oberkörper- oder Armhaltung) erfolgt. Um die Körperhaltung valide bewerten zu können, sollten diese Bedingungen in weiteren Analysen berücksichtigt werden (DGUV 2015).

Greifraumanalyse: Eine weitere Möglichkeit, ungünstige Körperhaltungen zu erkennen, ist die Greifraumanalyse. Greifräume sind Bereiche um den Menschen, in denen Objekte ohne wesentliche Haltungsänderung

berührt, ergriffen oder verändert werden können (Schmidtke und Jastrzebska-Fraczek 2013). Für die Einrichtung und Anordnung von Arbeitsplätzen können die definierten Greifräume hilfreich sein. Die Greifräume werden grundsätzlich bestimmt durch eine konkrete Tätigkeit mit ihren Randbedingungen sowie durch die Anatomie des Mitarbeiters. Sie gelten also oftmals nur für eindeutig definierte Fälle (Schlick et al. 2018). Nach dem VDI Handbuch lässt sich der Greifraum in einen geometrisch maximalen Greifraum, einen physiologisch maximalen Greifraum und einen kleinen Greifraum einteilen. Der geometrisch maximale Greifraum ist der Raum, der bei unbewegtem Oberkörper mit maximal ausgestrecktem Arm und unter Mitbewegung des Schultergelenks umfahren werden kann. Unter dem physiologisch geometrisch maximalen Greifraum ist der Raum zu verstehen, der mit entspanntem Arm und ohne Mitbewegung des Schultergelenks bei unbewegtem Oberkörper umfahren werden kann. Dieser Greifraum ist in der Praxis besonders wichtig und etwa zehn Prozent kleiner als der geometrisch maximale Greifraum. Für häufig wiederkehrende Griffbewegungen wird der kleine Greifraum empfohlen. Dieser wird definiert durch den Raum, der bei unbewegtem Oberkörper mit herunterhängenden Oberarmen und gegebenenfalls aufgestützten Unterarmen entsteht (Verein Deutscher Ingenieure und Gesellschaft Produktionstechnik 1980). Im Assistenzsystem wird der geometrisch maximale Greifraum für beide Körperseiten visualisiert, der individuell für den Mitarbeiter auf der Grundlage seiner Körpermaße erstellt wird. Die Begrenzung des Greifraums basiert auf den maximalen Gelenkwinkeln der Schulter in den verschiedenen Körperachsen (Pöttker und Lödding 2024; Schünke et al. 2022).

Messtechnische Analyse der DGUV: Dieses messtechnische Bewertungsverfahren wird verwendet, um den Zeitanteil nicht empfohlener Körperhaltungen/Bewegungen zu ermitteln. Es wurde im Rahmen des Gemeinschaftsprojekts MEGAPHYS der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und der DGUV entwickelt. Das Verfahren hat zum Ziel, den Anteil der Zeit bei einer Tätigkeit zu bestimmen, in der nicht empfohlene Haltungen oder Bewegungen eingenommen werden. Dies gilt für verschiedene Körperregionen, wie zum Beispiel den Nacken und die Halswirbelsäule (HWS), die Schultern und Oberarme (links und rechts), die Ellenbogen und Unterarme (links und rechts), die Hände und Handgelenke (links und rechts) sowie den unteren Rücken und die Lendenwirbelsäule (LWS). Bei der Bewertung werden verschiedene Aspekte berücksichtigt, wie die Intensität der Bewegungen, die Winkelbereiche, die Dauer der Haltungen, die Art der Tätigkeit, die Abstützung von Körperteilen und die Kombination von Bewegungsrichtungen. Das Bewertungsverfahren prüft für jeden Datenpunkt, ob für die jeweilige Körperregion eine akzeptable oder nicht akzeptable Körperhaltung/Bewegung vorliegt. Zusätzlich wird ein kumulativer Wert ermittelt, der den Zeitanteil der nicht empfohlenen Körperhaltungen und Bewegungen pro Tätigkeit angibt (DGUV 2020). Dieser Wert wird dann entsprechend dem allgemeinen Risikokonzept von MEGAPHYS in vier Risikokategorien eingeteilt (BAuA 2019). Das Verfahren wurde im Assistenzsystem implementiert und kann vollständig automatisiert mit den Daten des MoCap-Systems durchgeführt werden (Pöttker und Lödding 2024).

AP 2.4 Grobkonzept der Visualisierung (1 PM)

Um die Ergonomie- und Produktivitätsanalysen in eine Struktur zusammenzuführen, wird zwischen einer Live-Analyse und einer Ablaufanalyse unterschieden. Die Live-Analyse umfasst die Messung der Gelenkwinkel sowie die Greifraumanalyse in Echtzeit. Die Ablaufanalyse beinhaltet die MTM-1-Analyse, die PSA, das Line Balancing sowie die messtechnische Ergonomieanalyse der DGUV. Sie kann nach dem Bewegungsablauf und dem Reprocessing der aufgezeichneten MoCap-Daten erfolgen. Die Datenvisualisierung der Analyseergebnisse soll anhand der in Tabelle 3: Ergonomie- und Produktivitätskennzahlen dargestellten Kennzahlen und Graphen erfolgen.

Tabelle 3: Ergonomie- und Produktivitätskennzahlen

Kennzahl	Analyse	Analysetyp	Darstellungsform(en)
Gelenkwinkel mit Risikobewertung	Messung der Gelenkwinkel	Live-Analyse	Gauge-Chart
Greifraumüberschreitung	Greifraumanalyse	Live-Analyse	Digitales Menschmodell mit Greifraum
Soll-/Ist-Zeiten-Abweichung	MTM-1-Analyse	Ablaufanalyse	Tabelle, Balkendiagramm
Soll-Zeit	MTM-1-Analyse	Ablaufanalyse	Tabelle
Primär- und Sekundäranteil	PSA	Ablaufanalyse	Tabelle, Balkendiagramm
Ist-Zeit	Line Balancing	Ablaufanalyse	Tabelle, Balkendiagramm
Risikokategorie je Körperregion	Messtechnische Ergonomieanalyse	Ablaufanalyse	Tabelle, Kreisdiagramm, Digitales Menschmodell
Zusammensetzung des Risikowerts je Körperregion	Messtechnische Ergonomieanalyse	Ablaufanalyse	Tabelle, Kreisdiagramm, Digitales Menschmodell

Im Folgenden erfolgt eine kurze Beschreibung der Kennzahlen und ihrer Darstellungsform.

Gelenkwinkel mit Risikobewertung: Die gemessenen Gelenkwinkel werden mit den in [26] angegebenen Grenzwerten verglichen. Je nach Winkelbereich (neutral: grün, mittelgradig: gelb, endgradig: rot) wird das Gauge-Chart eingefärbt.

Greifraumüberschreitung: Der Anwender hat die Möglichkeit, sich den maximalen physischen Greifraum der linken oder rechten Hand visualisieren zu lassen. Sobald die linke oder rechte Hand den entsprechenden Greifraum überschreitet, färbt er sich rot, andernfalls ist er grün.

Soll-/Ist-Zeiten-Abweichung: Die Soll-Zeit ergibt sich aus der MTM-1-Analyse und die Ist-Zeit aus den Daten des MoCap-Systems. Dadurch können die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zeit für verschiedene Prozessschritte berechnet und in einer Tabelle oder einem Balkendiagramm visualisiert werden. Die Tabelle bietet beispielsweise die Möglichkeit, nach den größten Abweichungen zu filtern, um das größte Verbesserungspotenzial schnell zu identifizieren.

Soll-Zeit: Die Soll-Zeit ergibt sich aus der MTM-1-Analyse und kann in einer klassischen MTM-1-Tabelle dargestellt werden (Spalten: MTM-Code left, MTM-Code right, TMU-Wert, etc.).

Primär- und Sekundäranteil: Die Primär- und Sekundäranteile ergeben sich aus der PSA und können in Tabellenform oder als Balkendiagramm visualisiert werden. Auch hier bietet eine Tabelle den Vorteil, nach Prozessen mit einem hohen Sekundäranteil zu filtern, um das größte Verbesserungspotenzial zu identifizieren.

Ist-Zeit: Die Ist-Zeiten sind durch die MoCap-Daten gegeben und können beispielsweise durch das Line Balancing analysiert werden. Dabei wird der zeitliche Anteil der einzelnen Arbeitsvorgänge den jeweiligen Arbeitsplätzen zugeordnet, beispielsweise in Form eines Balkendiagramms.

Risikokategorie je Körperregion: Mit der messtechnischen Ergonomieanalyse wird für jede Körperregion eine Risikokategorie zwischen 1 und 4 ermittelt (1: dunkelgrün, 2: hellgrün, 3: gelb, 4: rot). Es kann ein Kreisdiagramm gewählt werden, wobei ein Segment des Diagramms einen Arbeitsablauf, einen Arbeitsplatz oder einen Arbeitsvorgang repräsentiert. Die höchste auftretende Risikokategorie bestimmt die Einfärbung dieses Segments. Alternativ können auch die Gelenke eines Menschmodells mit den Risikokategorien eingefärbt werden.

Zusammensetzung des Risikowerts je Körperregion: Die Risikokategorie wird aus einem prozentualen Risikowert abgeleitet. Die Zusammensetzung dieses Risikowerts aus Dynamik- und Winkelkategorien hilft dem Anwender, die Ursache für den Risikowert zu identifizieren. Diese Kennzahl kann ebenfalls in einer Tabelle, einem Kreisdiagramm oder Menschmodell dargestellt werden – als zusätzliche Information neben der Risikokategorie.

Tabelle 4 zeigt, wie die Darstellung der Kennzahlen im Assistenzsystem erfolgen soll.

Tabelle 4: Darstellung der Kennzahlen im Assistenzsystem

Tab	Kennzahl(en)	Analyseebene	Darstellungsform(en)
Live-Analyse	Gelenkwinkel mit Risikobewertung, Greifraumüberschreitung	---	Gauge-Chart, Digitales Menschmodell mit Greifraum
Gesamtübersicht	Soll-/Ist-Zeiten-Abweichung, Soll-Zeit, Ist-Zeit, Primär-/Sekundäranteil, Risikokategorie je Körperregion, Zusammensetzung des Risikowerts je Körperregion	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz- und Arbeitsvorgangsebene	Tabelle
MTM-1-Analyse	Soll-Zeit	Bewegungselementebene	Tabelle
PSA	Primär-/Sekundäranteil	Bewegungselementebene	Tabelle
Produktivitätsanalysen	Soll-/Ist-Zeiten-Abweichung, Primär-/Sekundäranteil, Ist-Zeit	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz- und Arbeitsvorgangsebene	Balkendiagramm
Ergonomieanalysen	Risikokategorie je Körperregion, Zusammensetzung des Risikowerts je Körperregion	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz- und Arbeitsvorgangsebene	Kreisdiagramm mit Menschmodell
Produktivität und Ergonomie im Vergleich	Soll-/Ist-Zeiten-Abweichung, Soll-Zeit, Ist-Zeit, Primär-/Sekundäranteil, Risikokategorie je Körperregion	Arbeitsplan-, Arbeitsplatz- und Arbeitsvorgangsebene	Vier-Felder-Matrix
Produktivität und Ergonomie im Zeitverlauf	Soll-/Ist-Zeiten-Abweichung, Soll-Zeit, Ist-Zeit, Primär-/Sekundäranteil, Risikokategorie je Körperregion	Arbeitsplanebene	Liniendiagramm

Die Kennzahlen und ihre Darstellungsformen sowie die Analyseebenen wurden bereits zuvor detailliert beschrieben. Ein Reiter im Assistenzsystem dient dazu, verschiedene Kennzahlen auf einer Anzeigeseite darzustellen. Insgesamt gibt es acht Reiter. Die Reiter „Produktivität und Ergonomie im Vergleich“ sowie „Produktivität und Ergonomie im Zeitverlauf“ werden im Folgenden detaillierter beschrieben; die übrigen Reiter sind aufgrund der vorherigen Beschreibung der Kennzahlen selbsterklärend.

Produktivität und Ergonomie im Vergleich: Die in Tabelle 4 dargestellten Kennzahlen sollen in einer Vier-Felder-Matrix miteinander verglichen werden können. Auf der Abszisse erscheint eine ausgewählte Produktivitätskennzahl, auf der Ordinate die höchste Risikokategorie. Ziel ist es, dass alle Punkte, die den Arbeitsablauf, die Arbeitsplätze oder die Arbeitsvorgänge widerspiegeln, im unteren linken Feld liegen, da hier der Soll-/Ist-Zeiten-Vergleich gering ist und eine niedrige Risikokategorie vorherrscht.

Produktivität und Ergonomie im Zeitverlauf: Um die Arbeitsplatz- und Prozessanpassungen über die Iterationen hinweg bewerten zu können, sollen die Produktivitäts- und Ergonomiekennzahlen in einem Liniendiagramm visualisiert werden. Dabei soll auf der Abszisse die Iteration, auf der linken Ordinate die höchste Risikokategorie und auf der rechten Ordinate die ausgewählte Produktivitätskennzahl abgebildet sein.

AP 2.5 Evaluierung des Grobkonzepts der Analysemethoden (1 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Dieses Teilarbeitspaket wurde parallel zu den Teilarbeitspaketen des Arbeitspaketes 3 bearbeitet. In einem ersten Schritt wurden die Ergonomie- und Produktivitätsanalysen im Digitalen Assistenzsystem implementiert, wobei der Fokus zunächst auf der Funktionalität und nicht auf der Datenauswertung, Visualisierung und dem Bedienkonzept lag. In einem zweiten Schritt wurden die Ergonomie- und Produktivitätsanalysen validiert.

Hinweis: Das Arbeitspaket wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) und der MTM ASSOCIATION durchgeführt. Dadurch war es möglich, die Implementierung der Analysen mit den Methodenentwicklern zu validieren.

Ergebnisse: Um das Digitale Assistenzsystem zu entwickeln, wurde die webbasierte Softwareplattform des IPMT genutzt. Dadurch ist eine plattformunabhängige Nutzung auf verschiedenen Endgeräten wie Smartphones und Tablets möglich, da keine Abhängigkeiten zu spezifischen Softwarelösungen existieren. Abbildung 5 zeigt die Systemarchitektur der Softwareplattform (Pöttker et al. 2024).

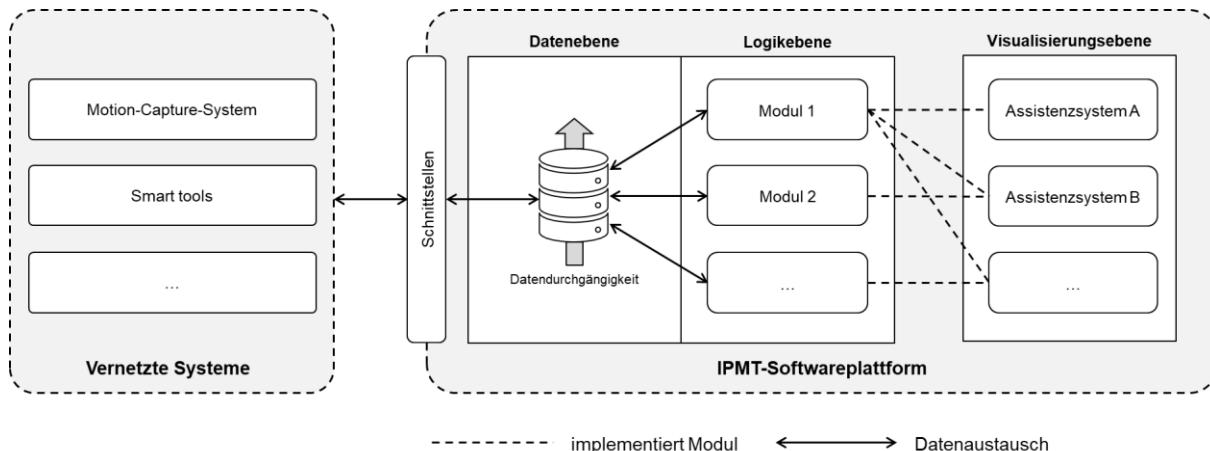


Abbildung 5: IPMT-Softwareplattform

Die Softwareplattform ist in die Daten-, Logik- und Visualisierungsebene unterteilt (Pöttker et al. 2024). Das Xsens MoCap-System wurde mithilfe des Software Development Kits des Herstellers mit dem Digitalen Assistenzsystem verknüpft. Dadurch werden die Daten für die Ergonomie- und Produktivitätsanalysen bereitgestellt, die auf der Logikschicht durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Analysen können über ein Assistenzsystem abgerufen und visualisiert werden. Gleichzeitig können über ein Assistenzsystem Daten eingegeben werden, um beispielsweise Stücklisten zu erstellen.

Die vom IFA entwickelte messtechnische Ergonomieanalyse wurde im Digitalen Assistenzsystem implementiert. Am Beispiel einer Kurbelgarnitur- und Getriebemontage wurde die korrekte Anwendung der Ergonomieanalyse validiert. Dabei wurden die Bewegungsdaten mit dem Digitalen Assistenzsystem und dem MoCap-System erfasst und gespeichert. Anschließend wurde die Ergonomieanalyse einerseits durch das Digitale Assistenzsystem und andererseits durch das IFA selbst durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Das Ergebnis ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Abweichung zwischen den Risikokategorien

Zielregion	Abweichung zwischen den Risikokategorien	
	Kurbelgarnitur	Getriebe
Kopf	0	0
Oberarm links	+1	-2
Oberarm rechts	0	0
Ellenbogen links	0	0
Ellenbogen rechts	+1	0
Handgelenk links	0	0
Handgelenk rechts	0	0
Rumpf	+1	0

Bei der Kurbelgarnitur beträgt die Abweichung zwischen den berechneten Risikokategorien für den linken Oberarm, den rechten Ellenbogen und den Rumpf jeweils +1. Das IFA hat in jedem Fall die Risikokategorie 1 berechnet, das Digitale Assistenzsystem die Kategorie 2. Da sowohl Kategorie 1 als auch Kategorie 2 akzeptabel sind, wurde weder ein Risiko fälschlicherweise erkannt, noch wurde ein Risiko nicht erkannt. Grundsätzlich ist es jedoch besser, ein nicht vorhandenes Risiko zu erkennen, als ein vorhandenes Risiko nicht zu erkennen. Dieser Fall tritt bei dem Getriebe auf. Während das IFA eine Risikokategorie von 4 für den linken Oberarm berechnet, zeigt das Digitale Assistenzsystem einen Risikowert von 2 an. Die Ursache ist, dass das Digitale Assistenzsystem die vom MoCap-System bereitgestellten Schulterwinkel nutzt, während das IFA mit diesen Werten weitere Berechnungen durchführt. Dadurch kann es teilweise zu unterschiedlichen Berechnungen der Risikokategorie für die Oberarme kommen. Bei den Gelenkwinkeln der anderen Zielregionen stimmen die vom IFA berechneten Werte nahezu überein mit denen des Digitalen Assistenzsystems, weshalb hier keine bzw. nur geringe Abweichungen zwischen den Risikokategorien auftreten. Für den industriellen Einsatz sollten die Berechnungen der Schulterwinkel jedoch angepasst werden, um dieselben Werte wie das IFA zu erhalten.

Um die MTM-1-Analyse gemeinsam mit der MTM ASSOCIATION zu validieren, wurden die aufgenommenen Daten der Kurbelgarniturmontage genutzt, um mit dem Digitalen Assistenzsystem sowie manuell durch MTM-Experten eine MTM-1-Analyse zu erstellen. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich der ermittelten Vorgabezeit und des gemessenen Zeitaufwands für die Erstellung der Analyse miteinander verglichen, wie Abbildung 6 zeigt.

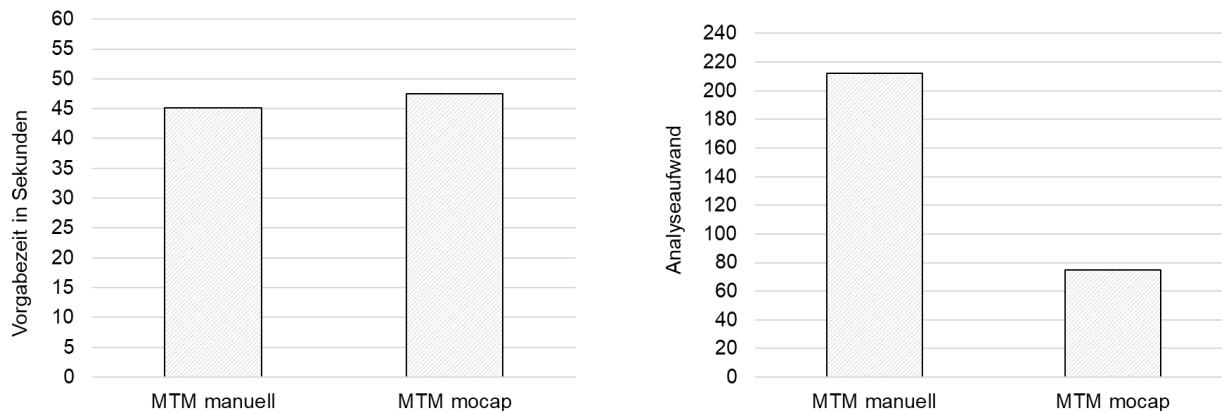


Abbildung 6: Validierung der MTM-1-Analyse

Das linke Säulendiagramm zeigt, dass die Gesamtvorgabezeiten (genauer Gesamtgrundzeiten) der manuellen MTM-1-Analyse und der MTM-1-Analyse, die mit dem MoCap-System und MTMmotion ermittelt wurde, nur um 5 % voneinander abweichen. Das rechte Säulendiagramm zeigt, dass sich der Analyseaufwand mit dem MoCap-System und MTMmotion im Vergleich zur manuellen MTM-1-Analyse um 65 % reduziert hat. Aufgrund des deutlich reduzierten Aufwands eignet sich das Digitale Assistenzsystem sowohl für die Gestaltung und Verbesserung von Arbeitsplätzen und -prozessen in der frühen Planungsphase (z. B. im CE) als auch bei laufender Produktion (Pöttker et al., 2025).

AP 3 Feinentwicklung der Methoden im Digitalen Assistenzsystem (10 PM)

Ziele und Arbeitsprogramm: Ziel dieses Arbeitspakets war es, die Ergonomie- und Produktivitätsanalysen aus AP 2 zu detaillieren, zu automatisieren und in das Digitale Assistenzsystem zu integrieren. In einem

ersten Schritt (AP 3.1) sollte ein Vorgehen entwickelt werden, mit dem sich einzelne Arbeitsschritte analog zur MTM-Logik erkennen lassen und mit dem sich für jeden Arbeitsschritt Bewegungs- und Prozessmerkmale aus den Bewegungsdaten extrahieren lassen. Im zweiten Schritt (AP 3.2) sollte das Digitale Assistenzsystem um die Funktion erweitert werden, relevante Metadaten für die Analysen eingeben zu können. Der dritte Schritt (AP 3.3) umfasste die Entwicklung einer Zugriffslogik für die Datenauswertung. Im vierten Schritt (AP 3.4) sollte die eigentliche Datenauswertung der aufgenommenen Daten erfolgen. Im fünften Schritt (AP 3.5) sollten die Visualisierung und das Bedienkonzept in Anlehnung an das in AP 2.3 entwickelte Grobkonzept umgesetzt werden. Im letzten Schritt (AP 3.6) sollten die Dokumentation der Verbesserungsschleifen aus den CE-Workshops und die Dokumentation der Arbeitsabläufe im Digitalen Assistenzsystem implementiert werden.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse der AP 3.1 und AP 3.7 beschrieben.

AP 3.1 Arbeitsschritterkennung und Messung von Bewegungs- und Prozessmerkmalen (1 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Im Digitalen Assistenzsystem wurde ein Vorgehen implementiert, mit dem sich Arbeitsabläufe analog zur MTM-Logik in Arbeitsvorgänge und Bewegungselemente unterteilen lassen. Dadurch ist es möglich, diesen Prozessabschnitten Analyseergebnisse zuzuordnen.

Ergebnisse: Jedem Arbeitsvorgang ist ein Material zugeordnet, das während dieses Vorgangs montiert wird. Bei einer Anfrage an MTMmotion (Schnittstelle der MTM ASSOCIATION zur Erstellung von MTM-Analysen, vgl. AP 2.2) wird die Materialnummer mit übergeben. Wenn MTMmotion die MTM Codes für die Analyse zurückgibt, sind den einzelnen Bewegungselementen die zuvor angegebenen Materialnummern zugeordnet. Dadurch ist es möglich, die Bewegungselemente über den Arbeitsplan auch mit den Arbeitsvorgängen zu verknüpfen. Ein Arbeitsvorgang beginnt bei der ersten Interaktion mit dem zugeordneten Material und endet bei der ersten Interaktion mit dem nächsten Material. Die Bewegungselemente definieren demnach die Vorgabezeiten (genauer Grundzeiten) für jeden einzelnen Arbeitsvorgang (Pöttker et al., 2025b).

AP 3.2 Erfassung von Metadaten (0,5 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Es wurde ermittelt, welche Informationen manuell erfasst werden müssen. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine nachträgliche Angabe von Metadaten erforderlich ist, damit die Analysen nach der Vorbereitung automatisch durchgeführt werden können.

Ergebnisse: Der Anwender muss die folgenden Daten manuell im Digitalen Assistenzsystem eingeben oder korrigieren:

- Betriebsmittel- und Mitarbeiterdaten (manuell)
- Stückliste (manuell)
- Arbeitsplan (teilautomatisiert, manuelle Anpassung erforderlich)
- Bewegungsdaten (automatisiert, ggf. Korrektur erforderlich)

Wie bereits beschrieben, wird der Arbeitsplan automatisch aus der Stückliste erzeugt und muss vom Anwender nur angepasst werden. Die Bewegungsdaten werden ebenfalls automatisch aus den MoCap-Daten berechnet, müssen aber vom Anwender überprüft und ggf. angepasst werden.

AP 3.3 Entwicklung einer Zugriffslogik für die Datenauswertung (0,5 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Damit der Anwender des Digitalen Assistenzsystems die Daten auswerten kann, müssen sie visualisiert werden (vgl. AP 2.4). Hierzu wurde eine Zugriffslogik für die Datenauswertung implementiert.

Ergebnisse: Der Arbeitsplan bildet die Grundlage für die Analysestruktur im Assistenzsystem. Er enthält Arbeitsvorgänge, denen Mitarbeiter, Betriebsmittel und ein Arbeitsplatz zugeordnet werden können (vgl. AP 2.1). Die Arbeitsvorgänge sind durch Bewegungselemente zeitlich definiert (Soll- und Ist-Zeiten, vgl. AP 3.1). Durch die Zuordnung von Arbeitsplätzen zu Arbeitsvorgängen können die Ergebnisse auf Arbeitsvorgangsebene für die Arbeitsplatzebene aggregiert werden. Ebenso können die Ergebnisse auf der Arbeitsplatzebene für die Arbeitsplanebene aggregiert werden. Dabei hat der Anwender die Möglichkeit, sich die Analyseergebnisse auf verschiedenen Detailebenen mithilfe unterschiedlicher Visualisierungen anzeigen zu lassen (vgl. AP 2.4). Für jede Ausführungsvariante, die den gesamten Arbeitsablauf eines Produkts umfasst, werden die Analyseergebnisse im Digitalen Assistenzsystem gespeichert. Der Anwender kann zunächst das Produkt und die Ausführungsvariante in einer Ergebnisansicht auswählen und danach die Ergebnisse analysieren.

AP 3.4 Datenauswertung (4 PM) und AP 3.5 Visualisierung und Bedienkonzept (2 PM)

Da die Bearbeitung dieser beiden Arbeitspakete sehr eng miteinander verknüpft ist, werden sie gemeinsam beschrieben.

Durchgeführte Arbeiten: Die in AP 2 beschriebenen Analysen wurden im Digitalen Assistenzsystem implementiert. Damit einhergehend wurde das Grobkonzept der Visualisierung umgesetzt.

Ergebnisse: Im Digitalen Assistenzsystem können unter dem Reiter „Live-Analyse“ die gemessenen Gelenkwinkel und der Greifraum aufgerufen werden. Die Gelenkwinkel werden in Echtzeit als Gauge-Charts auf dem Digitalen Assistenzsystem visualisiert, nachdem das MoCap-System kalibriert wurde (s. Abbildung 7). Das digitale Menschmodell wird in Echtzeit aus den Positionsdaten erzeugt. Zusätzlich wird der geometrisch maximale Greifraum für beide Körperhälften angezeigt, der individuell auf Basis der Körpermaße erstellt wird (s. Abbildung 8) (Pöttker und Lödding 2024).

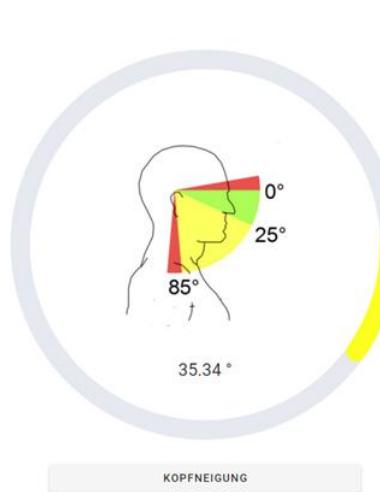


Abbildung 7: Gauge-Chart

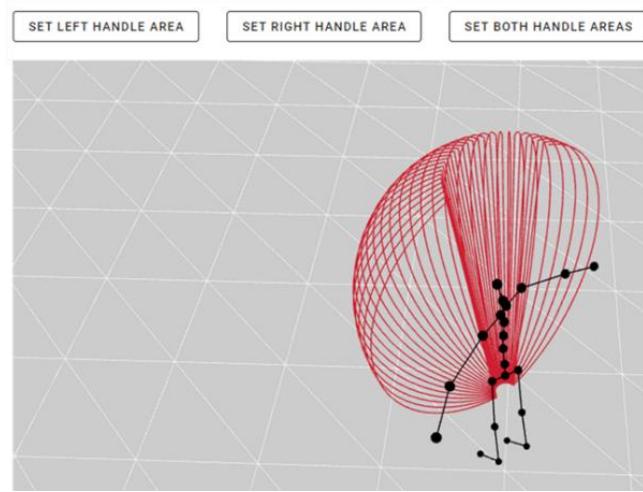


Abbildung 8: Greifraum der linken Körperhälfte

Unter dem Reiter „Ablaufanalyse“ stehen sechs Darstellungsmodi zur Verfügung: 1. Gesamtübersicht der Ergebnisse, 2. MTM-1-Analyse, 3. Primär-Sekundär-Analyse, 4. Ergonomie, 5. Produktivität und 6. Vergleich von Ergonomie und Produktivität. Die Gesamtübersicht zeigt alle Analyseergebnisse. Welche Ergebnisse angezeigt werden, hängt von dem Produkt, der Ausführungsvariante, der Analyseebene und den ausgewählten Spalten ab (s. Abbildung 9).

Gesamtübersicht der Ergebnisse

Produkt Getriebe	Version 1					
<input checked="" type="checkbox"/> Produkt	<input type="checkbox"/> Arbeitsplatz	<input type="checkbox"/> Arbeitsvorgänge	<input type="button" value="Arbeitsvorgang auswählen"/>			
Spalten auswählen				<input type="button" value="BESTÄTIGEN"/>		
Produkt, Startframe, Endframe, Ist-Zeit [s], Sollzeit [s], Soll-Ist-Abweichung [%], Größter RK						
Produkt	Startframe	Endframe	Ist-Zeit [s]	Sollzeit [s]	Soll-Ist-Abweichung [%]	Größter RK
Getriebe	0	2283	38.0	34.2	11.1	2

Abbildung 9: Gesamtübersicht der Ergebnisse

Analog zur Gesamtübersicht können die MTM-1-Analyse und die Primär-Sekundär-Analyse auch auf Bewegungselementebene in einer Tabelle angezeigt werden (2. und 3. Darstellungsmodi). Wie Abbildung 10 zeigt, präsentiert der vierte Darstellungsmodus ausschließlich Ergonomiekennzahlen.

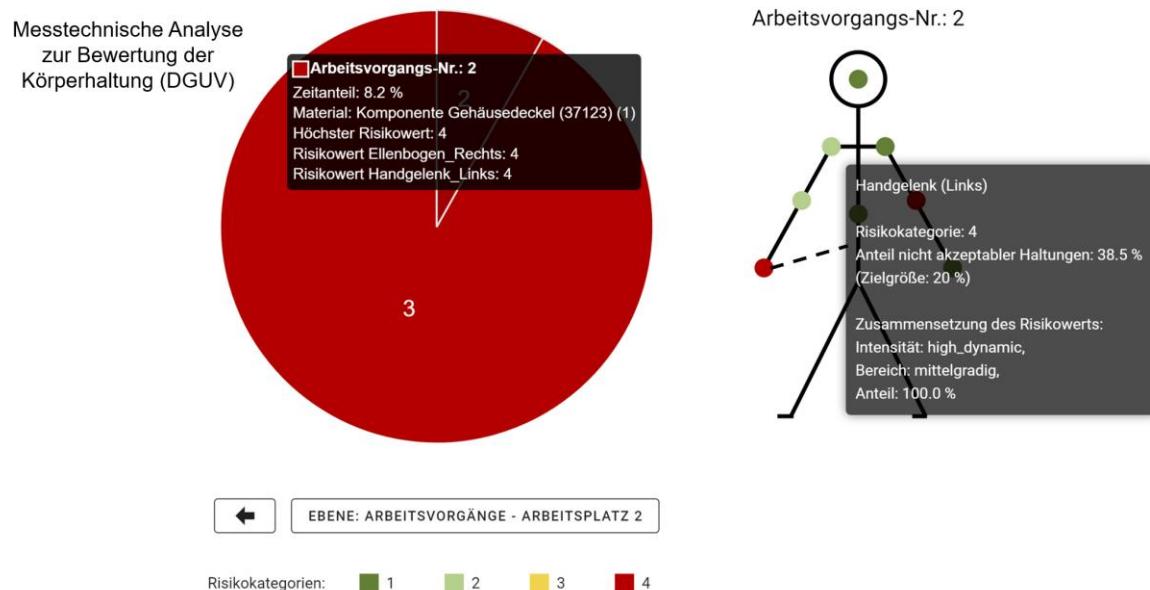


Abbildung 10: Auswertung der Ergonomieanalyse

Der Benutzer kann durch die verschiedenen Detailebenen navigieren, indem er auf eine Fläche im Kreisdiagramm klickt. Mit dem Pfeil unter dem Kreisdiagramm kann er wieder zurück navigieren. Weiterhin können durch das Anklicken eines Gelenks im Strichmännchen weitere Detailinformationen zur Zusammensetzung des Risikowerts abgerufen werden.

Die Visualisierung der Produktivitätskennzahlen erfolgt gemäß Abbildung 11. In diesem Modus werden die Ergebnisse des Line Balancings, die Soll-Ist-Zeitvergleiche sowie der Primär-Sekundär-Analyse dargestellt.

Über eine Umschalttaste kann der Benutzer zwischen dem Soll-Ist-Zeitvergleich und der Primär-Sekundär-Analyse wechseln. Darüber hinaus besteht erneut die Möglichkeit, zwischen den verschiedenen Detailebenen zu navigieren.

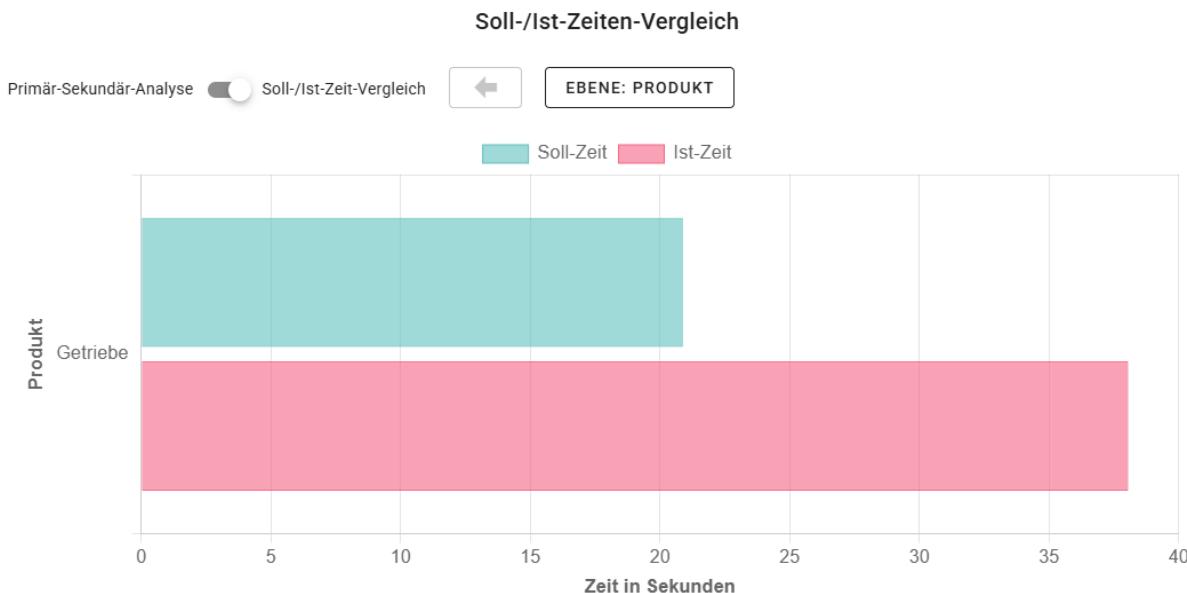


Abbildung 11: Auswertung der Produktivitätsanalysen

Schließlich können auch Produktivitäts- und Ergonomiekennzahlen im Digitalen Assistenzsystem miteinander verglichen werden, wie Abbildung 12 zeigt.

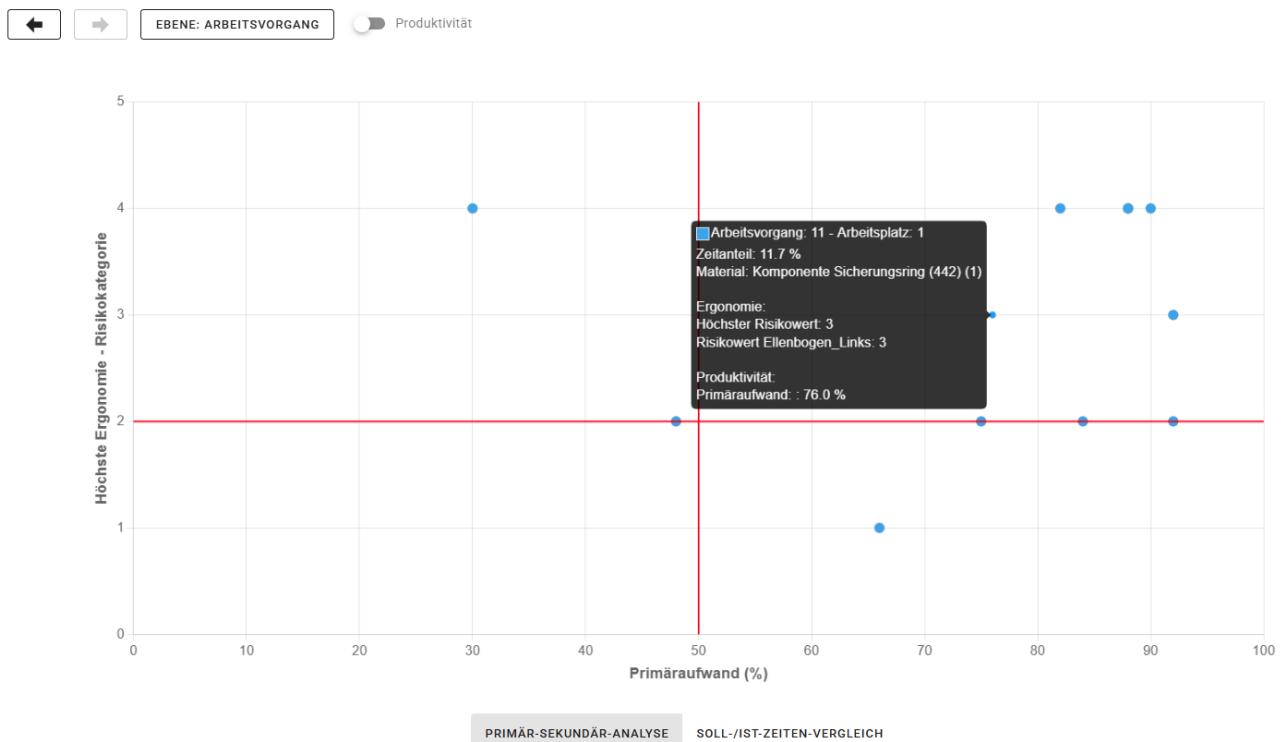


Abbildung 12: Vergleich von Produktivität und Ergonomie

Auf der Abszisse kann zwischen zwei Produktivitätskennzahlen gewählt werden, auf der Ordinate wird die höchste auftretende Risikokategorie angezeigt. Auch hier hat der Anwender die Möglichkeit, zwischen den

verschiedenen Detailebenen zu navigieren. Durch Anklicken eines Punktes können weitere Informationen zu Ergonomie und Produktivität abgerufen werden.

AP 3.6 Dokumentation (1 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Es wurde eine Darstellung entwickelt, die den Verbesserungsfortschritt über die einzelnen Ausführungsvarianten im CE-Workshop in Form von Ergonomie- und Produktivitätskennzahlen veranschaulicht. Darüber hinaus ist es möglich, einen Arbeitsplan zu erstellen, der die Arbeitsabläufe beschreibt.

Ergebnisse: Abbildung 13 zeigt, wie die Ergonomie- und Produktivitätskennzahlen über die Ausführungsvarianten im Digitalen Assistenzsystem dargestellt werden.

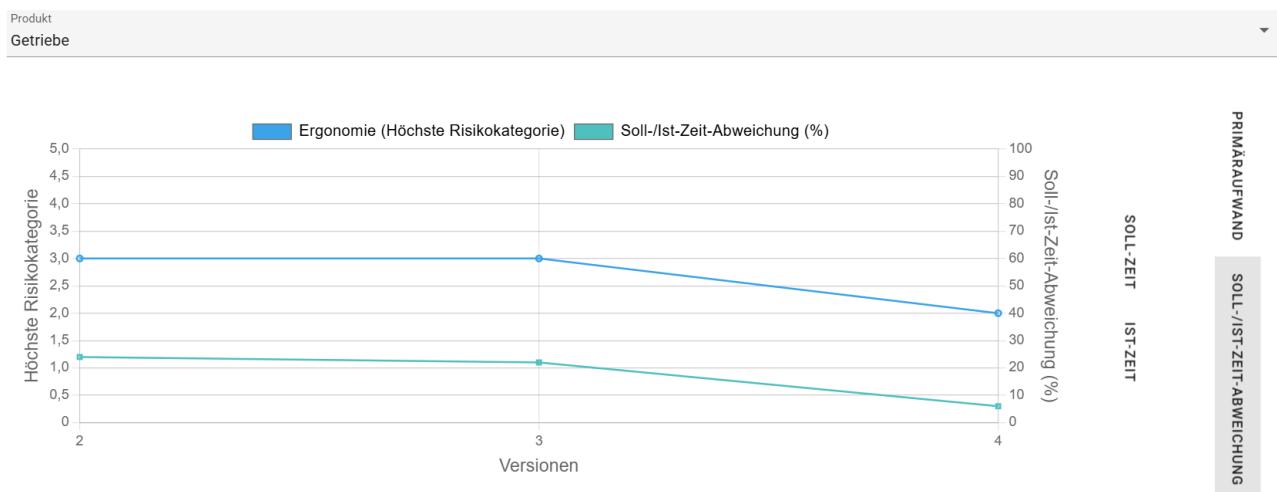


Abbildung 13: Ergonomie und Produktivität im Zeitverlauf

In dieser Darstellungsansicht werden die Ergebnisse auf der obersten Detailebene, der Arbeitsablaufebene, dargestellt. Auf der rechten Ordinate kann zwischen zwei Produktivitätskennzahlen gewechselt werden. Durch Anklicken eines Datenpunktes werden weitere Informationen zur Ergonomie- oder Produktivitätskennzahl angezeigt. Durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen lassen sich in der Datensatzverwaltung für die jeweilige Ausführungsvariante dokumentieren. Die Dokumentation der Arbeitspläne wurde bereits in AP 2.1 beschrieben.

AP 3.7 Evaluation (1 PM)

Durchgeführte Arbeiten: Die Analysen wurden während der Entwicklung sowohl in der Modellfabrik des IPMT als auch in der Industrie evaluiert.

Hinweis: Das Arbeitspaket wurde in enger Zusammenarbeit mit zwei Industriepartnern durchgeführt.

Ergebnisse: In einer Abschlussarbeit wurde das System dazu eingesetzt, um eine Arbeitsstation in der Modellfabrik, an dem ein Getriebe montiert wird, schrittweise zu optimieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt.

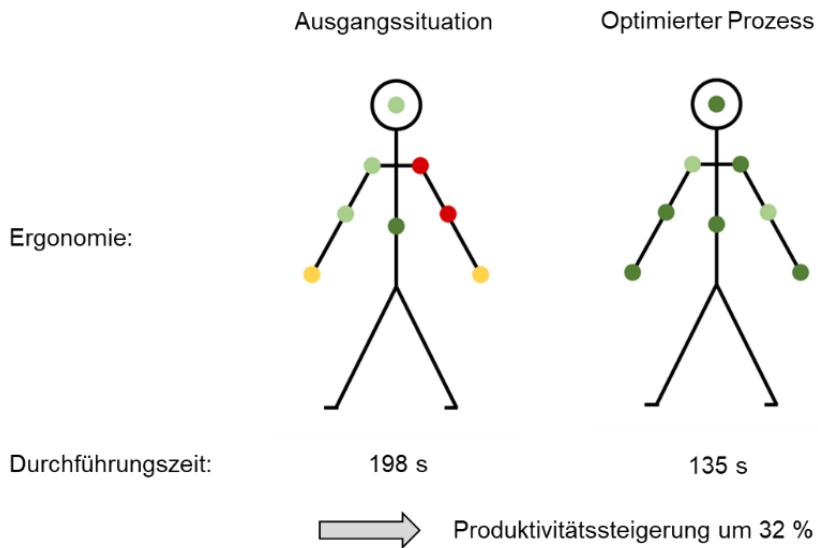


Abbildung 14: Ergebnisse des Optimierungsprozesses

Beim optimierten Versuch liegen alle Risikowerte der Gelenke im akzeptablen Bereich und die Produktivität hat sich im Vergleich zum Ausgangsversuch um 32 % erhöht. Um diese Ergebnisse zu erzielen, waren sechs Durchläufe notwendig, in denen der Prozess bzw. der Arbeitsplatz angepasst wurde. Beispielsweise wurde der Prozess geändert, indem ein Akkuschrauber anstelle eines Schraubendrehers verwendet wurde. Zu den Arbeitsplatzanpassungen zählten beispielsweise die neue Anordnung von Materialien oder die Veränderung der Tischhöhe.

Vor dem abschließenden CE-Workshop (AP 4 und AP 5) wurden in der Industrie die Live-Analyse und die messtechnische Ergonomieanalyse evaluiert. Dabei wurde lediglich die Analysen durchgeführt, jedoch noch keine Arbeitsplatz- oder Prozessverbesserungen vorgenommen.

Bei einem Hersteller für Medizin- und Sicherheitstechnik wurde das Digitale Assistenzsystem an einem Arbeitsplatz eingesetzt, an dem Messgeräte verpackt werden. Die Mitarbeiter an diesem Arbeitsplatz haben schon vor der Analyse über gesundheitliche Probleme im Nacken- und Schulterbereich berichtet. Die Ergebnisse der Live-Analyse zeigen, dass sich die Pronations-/Supinationswinkel der Unterarme größtenteils außerhalb des akzeptablen Bereichs befanden. Die Ursache hierfür ist tätigkeitsbezogen und hängt nicht mit der Arbeitsplatzgestaltung zusammen. Auffällig ist außerdem der Flexion-/Extensionswinkel des rechten Oberarms. Dieser kann auf eine unzureichende Materialanordnung zurückzuführen sein. Zuletzt lagen die Winkel der Halskrümmung zu einem großen Teil im endgradigen Bereich. Mögliche Ursachen hierfür sind eine falsch eingestellte Tischhöhe, obwohl der Tisch an diesem Arbeitsplatz höhenverstellbar ist. Die Greifraumanalyse hat gezeigt, dass sich die Hände während der Fügeoperation, die auf dem Tisch stattfand, größtenteils außerhalb des Greifraums befanden. Hier wird der Zusammenhang zwischen dem Greifraum und den zulässigen Körperhaltungen deutlich. Die messtechnische Analyse hat die Ergebnisse der Live-Analyse bestätigt, da der linke Ellenbogen und der rechte Oberarm (beide in der 3. Risikokategorie) sowie der Kopf (in der 4. Risikokategorie) im unergonomischen Bereich liegen.

Das Digitale Assistenzsystem wurde bei einem Hersteller für mechanische und elektronische Antriebstechnik eingesetzt, um den Montageablauf eines Universalgetriebes zu analysieren. Bei den Mitarbeitern an diesem Arbeitsplatz traten in der Vergangenheit bereits gesundheitliche Probleme an den Handgelenken auf. Diese wurden darauf zurückgeführt, dass sie eine Stanze bedienen mussten, um ein Kugellager in das

Getriebe einzupressen. Ursprünglich wurde die Presse durch das Betätigen zweier Knöpfe unter der Arbeitsfläche bedient. Inzwischen wurden ergonomische Vorkehrungen getroffen, indem sogenannte Safe-Balls installiert wurden, über die die Stanze nun aktiviert wird. Die Ergebnisse der Live-Analyse zeigen, dass das neue Arbeitsplatzdesign die Handgelenke deutlich entlastet. Auffällig waren allerdings die Werte für die Flexions-/Extensionswinkel und Pronations-/Supinationswinkel des rechten Ellenbogens. Diese können beispielsweise durch eine falsch eingestellte Höhe der Safe-Balls oder des Tisches verursacht worden sein. Dies erklärt auch, warum der Flexions-/Extensionswinkel des rechten Oberarms zu einem großen Teil im endgradigen Bereich lag. Die messtechnische Analyse hat bestätigt, dass die Handgelenke am alten Arbeitsplatz im nicht ergonomischen Bereich liegen (linkes Handgelenk in Risikokategorie 4, rechtes Handgelenk in Risikokategorie 3). Zudem wiesen der rechte Ellenbogen und der rechte Oberarm die 3. Risikokategorie auf. Beim neuen Arbeitsplatz waren die Handgelenke im ergonomischen Bereich, jedoch lagen beide Ellenbogen in der 4. Risikokategorie. Ursache hierfür sind die Pronations-/Supinationswinkel der Ellenbogen, da die Betätigung der Safe-Balls eine unergonomische Haltung der Unterarme erfordert.

Die Evaluationen in den Partnerunternehmen zeigen, dass durch die Live-Analyse bereits sehr gute Erkenntnisse über stark belastete Gelenke gewonnen werden können. Mithilfe der Ergebnisse der Live-Analyse und der messtechnischen Analyse konnten zudem die von den Mitarbeitern beschriebenen gesundheitlichen Beschwerden erklärt und bestätigt werden.

AP 4: Entwicklung des CE-Workshops (2 PM)

Ziele und Arbeitsprogramm: Ziel war es, bestehende CE-Workshops weiterzuentwickeln. Da mit dem Digitalen Assistenzsystem jedoch neue, komplexe Analysemethoden zum Einsatz kommen, musste das Vorgehen der konventionellen CE-Workshops angepasst werden. Die ursprünglichen Phasen Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung sollten beibehalten werden.

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden Schritte definiert, die bei der Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung von Analysen mit dem Digitalen Assistenzsystem auftreten. Anschließend wurden am Beispiel der Kurbelgarniturmontage die Zeiten für diese Schritte gemessen. Zudem wurden die Teilnehmer des Workshops und ihre Rollen festgelegt.

Hinweis: Das Arbeitspaket wurde in enger Zusammenarbeit mit der MTM ASSOCIATION e. V. bearbeitet.

Anmerkung: Die definierten Schritte sind sowohl bei einer Arbeitsplatzgestaltung mit dem CE als auch bei der Verbesserung bestehender Arbeitsplätze während der laufenden Produktion notwendig. Im Folgenden liegt der Fokus auf der Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung von Analysen mit dem Digitalen Assistenzsystem. Die Grobplanung und der Aufbau von Arbeitsplätzen werden nicht berücksichtigt.

Ergebnisse: Es dauert 58 Sekunden, die Kurbelgarnitur zu montieren. Die Zeitaufwände der einzelnen Schritte zur Vorbereitung und Durchführung der Analyse für diesen Versuch sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Schritte zur Vorbereitung und Durchführung der Analysen

Schritt	Beschreibung	MoCap [min]
1	Bauteile & Betriebsmittel vermessen	15
2	Arbeitsplan anlegen	2
3	Ablaufdetails besprechen	5
4	MoCap-System anziehen und kalibrieren	20
5	Ablauf durchführen & Video aufnehmen	4
6	Reprocessing und Speichern der Daten	3
7	Detaillierung der Arbeitsvorgänge	10
8	Aufbereitung der Bewegungsdaten	15
9	Durchführung der Analysen	1
		75

Vorbereitung Durchführung

Insgesamt sind vier Schritte erforderlich, um die Analysen vorzubereiten, und fünf Schritte, um sie durchzuführen. Die Gesamtdauer hierfür beträgt 75 Minuten. Am zeitaufwendigsten ist es, die Bauteile und Betriebsmittel zu vermessen, das MoCap-System anzuziehen und zu kalibrieren, die Arbeitsvorgänge zu detaillieren und die Bewegungsdaten aufzubereiten. Die Schritte zur Vorbereitung sind nur bei der ersten Ausführungsvariante erforderlich, bei weiteren Aufnahmen hingegen nicht (Pöttker et al. 2025a). Um die Zeit für die Detaillierung der Arbeitsvorgänge und die Aufbereitung der Bewegungsdaten zu verkürzen, wurden folgende Funktionen im Assistenzsystem ergänzt:

- **Übernahme von Elementen:** Es ist möglich, Elemente aus vorherigen Ausführungsvarianten für neue Ausführungsvarianten bei der Detaillierung der Arbeitsvorgänge zu übernehmen und anzupassen.
- **Zusammenfügen von Aufnahmen:** Oft werden zwischen zwei Ausführungsvarianten nur wenige Arbeitsplatz- oder Prozessanpassungen vorgenommen, um die Effekte der Veränderung besser messen zu können. Daher wurde eine Funktion in das Assistenzsystem integriert, die die MoCap-Daten, das Video und die aufbereiteten Bewegungsdaten aus der vorherigen Ausführungsvariante übernimmt. Aus der neuen Aufnahme werden nur diejenigen Ausschnitte übernommen, die sich von der vorherigen Aufnahme unterscheiden.

In der Nachbereitung müssen die Ergebnisse mit den Workshopteilnehmern diskutiert, Probleme identifiziert und Ziele festgelegt werden. Um diese zu erreichen, sind neue Maßnahmen zur Arbeitsplatz- und Prozessverbesserung abzuleiten und umzusetzen.

Insgesamt gibt es fünf Teilnehmergruppen am Workshop:

- (1) **Systemanwender:** Die Aufgabe des Systemanwenders ist es, alle in Tabelle 6 beschriebenen Schritte in Zusammenarbeit mit den anderen Teilnehmern mit dem Digitalen Assistenzsystem durchzuführen.
- (2) **Mitarbeiter:** Der Mitarbeiter hat die Aufgabe, die Ablaufdetails mit dem Systemanwender zu besprechen und den Arbeitsablauf mit dem MoCap-System durchzuführen. Zudem soll er bei der Nachbereitung Verbesserungsvorschläge einbringen, da diese eventuell nicht aus den Daten ableitbar sind.
- (3) **Industrial Engineer:** Aufgabe der Industrial Engineers ist es, ein Prozessverständnis für alle Beteiligten zu schaffen und bei der Ergebnisbesprechung Verbesserungen vorzuschlagen.

- (4) **Workshop-Moderator:** Die Aufgabe des Workshop-Moderators besteht darin, die Ziele des Workshops im Vorfeld zu erläutern, den Ablauf zu koordinieren und dabei sicherzustellen, dass alle geplanten Schritte umgesetzt werden.
- (5) **Experten:** Die Experten unterstützen die Beteiligten dabei, die Analyseergebnisse zu interpretieren, sinnvolle Maßnahmen abzuleiten und diese anschließend umzusetzen.

Um den konventionellen CE-Workshopverlauf beizubehalten, wurde der PDCA-Zyklus verwendet, um die in Tabelle 6 aufgeführten Schritte sowie die Aufgaben der Nachbereitung strukturell einzuordnen. Der PDCA-Zyklus ist eine Vorgehensweise im kontinuierlichen Verbesserungsprozess, die iterativ durchlaufen wird, um Prozesse systematisch zu optimieren. Abbildung 15 zeigt den Prozess, der innerhalb der CE-Workshops durchlaufen werden kann (REFA 2016).

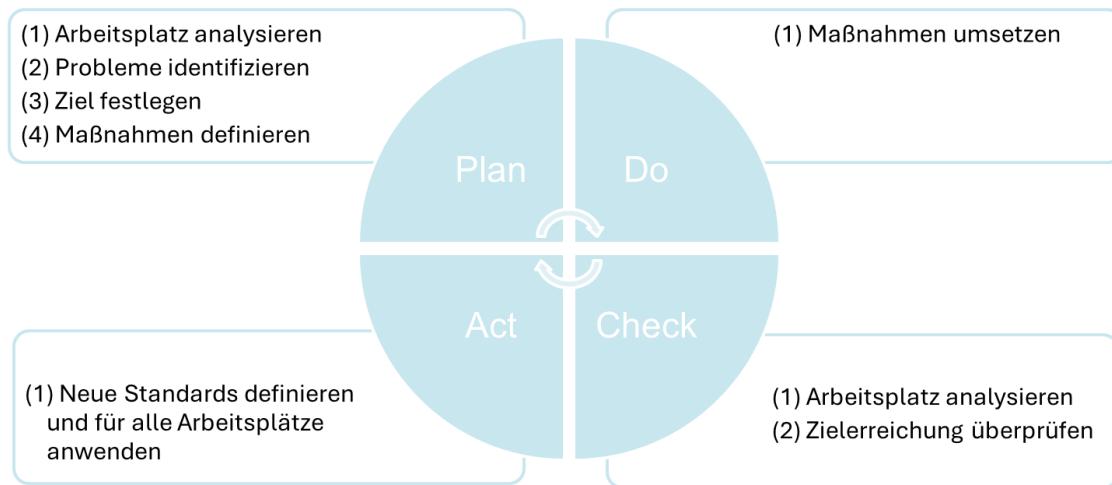


Abbildung 15: PDCA-Zyklus

Die neun Schritte aus Tabelle 6 werden immer dann angewendet, wenn ein Arbeitsablauf neu analysiert wird. Die Nachbereitung beinhaltet in der Plan- und Do-Phase die bereits oben genannten Aufgaben. In der Check-Phase muss überprüft werden, ob die Ziele erreicht wurden. Falls dies der Fall ist, können neue Standards definiert werden (Act-Phase). Wurden die Ziele nicht erreicht, müssen neue Maßnahmen definiert, umgesetzt und überprüft werden, um das zuvor definierte Ziel zu erreichen.

AP 5: Evaluierung am Praxisbeispiel (1 PM)

Ziel und Arbeitsprogramm: Ziel war es, bei zwei Partnerunternehmen Workshops mit dem Digitalen Assistenzsystem durchzuführen, um das Gesamtvorgehen zu evaluieren.

Durchgeführte Arbeiten: Bei zwei Industriepartnern wurde jeweils ein Workshop gemäß dem in AP 4 beschriebenen Vorgehen durchgeführt.

Ergebnisse: Bei einem Hersteller für Medizin- und Sicherheitstechnik wurde derselbe Arbeitsplatz zur Verpackung von Messgeräten untersucht wie bei der Evaluation in AP 3.7. Dabei wurde der PDCA-Zyklus zweimal durchlaufen. Beim ersten Durchlauf war das Ziel, die Ergonomie zu verbessern. Die mess-technische Analyse ergab, dass lediglich der rechte Ellenbogen in der dritten Risikokategorie liegt und der Risikowert mit 3,2 % nur minimal über dem Grenzwert der zweiten Risikokategorie (akzeptabel) liegt. Aufgrund der begrenzten Zeit vor Ort wurde beschlossen, die Produktivität zu analysieren und die Ergonomie als akzeptabel einzustufen. Dabei wurde festgestellt, dass große Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zeit

beim Hinlangen, Greifen und Bringen der Dokumente für das Messgerät auftreten. Die Videoaufnahme zeigte, dass die Abweichung dadurch entsteht, dass die Dokumente nur umständlich aus dem Behälter entnommen werden können. Als Maßnahme wurde abgeleitet, die Dokumente direkt vor dem Mitarbeiter auf dem Tisch zu platzieren. Dadurch konnte die Soll-Ist-Zeit-Abweichung des gesamten Arbeitsablaufs um 4 Prozentpunkte gesenkt werden, zudem stieg der Wirkungsgrad der PSA um 6 Prozentpunkte. Die Umplatzierung der Dokumente hatte zudem den positiven Effekt, dass die Soll-Zeit um 14 % von 56 s auf 48 s reduziert werden konnte. Nachteilig ist jedoch, dass der rechte Ellenbogenwert dadurch in die Risikokategorie 4 und der rechte Oberarm in die Risikokategorie 3 gelangt ist. Somit wurde die Produktivität verbessert, während sich die Ergonomie verschlechterte. Als Ausblick wurde festgehalten, dass die Bereitstellung der Dokumente verändert und die Materialien näher am Arbeitsplatz der Mitarbeiter platziert werden sollen, um die Ergonomie zu verbessern.

Bei Hersteller für mechanische und elektronische Antriebstechnik wurde derselbe Arbeitsplatz zur Getriebemontage untersucht wie bei der Evaluation in AP 3.7. Dabei wurde der PDCA-Zyklus zweimal durchlaufen. Beim ersten Durchlauf war das Ziel, die Ergonomie zu verbessern. Die messtechnische Analyse zeigt auch hier, dass lediglich die linke Schulter in der dritten Risikokategorie liegt und der Risikowert mit 0,9 % minimal über dem Grenzwert der zweiten Risikokategorie (akzeptabel) liegt. Aufgrund der begrenzten Zeit vor Ort wurde auch in diesem Fall beschlossen, die Produktivität zu analysieren und die Ergonomie als akzeptabel einzustufen. Besonders auffällig sind der hohe Sekundäraufwand bei der Aufnahme des Kugellagers und die große Abweichung der Ist- von den Soll-Zeiten beim Fügen des Sicherungsringes. Im ersten Durchlauf wurde das Kugellager umplatziert. Dadurch konnte der Sekundäraufwand bei der Aufnahme des Kugellagers um 70 % gesenkt werden, was wiederum den Sekundäraufwand des gesamten Arbeitsablaufs von 81 % auf 78 % reduziert. Bei der Ergonomie fällt auf, dass der linke Ellenbogen in der dritten Risikokategorie liegt. Ursache hierfür ist, wie in AP 3.7 bereits beschrieben, die unergonomische Betätigung der Safe-Balls. Da die Soll-Ist-Zeitenabweichung beim Fügen des Sicherungsringes weiterhin sehr hoch war und die Bedienung der Safe-Balls vor Ort nicht kurzfristig geändert werden konnte, wurde die manuelle Sicherungszange durch eine automatische ersetzt. Dadurch konnte die Soll-Ist-Zeitenabweichung beim Fügen des Sicherungsringes von 95 % auf 5 % und die des gesamten Arbeitsablaufs von 22 % auf 6 % gesenkt werden. In der zweiten Aufnahme ist die Ergonomie für alle Zielregionen in Ordnung. Daraus lässt sich schließen, dass die Bedienung im Grenzbereich zwischen einer ergonomischen und einer unergonomischen Haltung liegt. Es wird empfohlen, andere Taster/Schalter zur Bedienung der Presse einzusetzen.

Abschließend verdeutlicht die Evaluation des Digitalen Assistenzsystems den Nutzen für die Unternehmen:

Analyse der Ergonomie und Produktivität: Die Unternehmen können mit dem Digitalen Assistenzsystem sowohl die Ergonomie als auch die Produktivität ihrer Arbeitsabläufe analysieren. Durch den geringen Analyseaufwand und den geringen Bedarf an Expertenwissen im Vergleich zu konventionellen Methoden können Industrial Engineers Arbeitsabläufe schnell und detailliert analysieren.

Verbesserung der Arbeitsplatz- und Prozessgestaltung: Das Digitale Assistenzsystem eignet sich dazu, Arbeitsplätze und -prozesse ergonomisch und produktiv zu verbessern. Die enge Verknüpfung der Ergebnisse mit der Stückliste, dem Arbeitsplan und der Videoaufnahme erleichtert es dem Anwender, die Analyseergebnisse zu interpretieren und gezielte Verbesserungen vorzunehmen (Pöttker et al. 2025a).

Vorgabezeitermittlung: Bei der ersten Validierung wurde eine Abweichung von ca. 5 % zwischen einer manuellen MTM-1-Analyse und der durch das Digitale Assistenzsystem und MTMmotion ermittelten

Vorgabezeit festgestellt. Eine solche Genauigkeit ist für viele Anwendungsfälle ausreichend, allerdings muss diese Abweichung in weiteren Beispielen bestätigt werden (Pöttker et al. 2025a).

3 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal am IPMT

Der Starttermin des Projekts hat sich vom 01.08.2022 auf den 01.02.2023 verschoben. Grund hierfür war eine zeitaufwändige Personalsuche. Weiterhin wurde das Projekt vom 31.01.2025 kostenneutral auf den 31.05.2025 verlängert. Für das Forschungsprojekt waren insgesamt Zuwendungen für einen wissenschaftlichen Mitarbeiter über einen Zeitraum von 24 Monaten vorgesehen, die vollständig eingesetzt wurden.

- Ausgaben für Gerätebeschaffung

Es wurden keine Zuwendungen für Gerätebeschaffung beantragt.

- Ausgaben für Leistungen Dritter

Es wurden keine Zuwendungen für Leistungen Dritter beantragt.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Dank der in Abschnitt 3 aufgeführten Zuwendungen und der kostenneutralen Projektverlängerung war es möglich, alle Inhalte des genehmigten Antrags zu bearbeiten und die Projektziele zu erreichen. Der Arbeitsumfang des Antrags war daher angemessen und die geleistete Arbeit ist als notwendig anzusehen. Abschließend wurden alle Zuwendungen für die Projektbearbeitung eingesetzt und es wurden keine zusätzlichen Ressourcen beansprucht.

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

KMUs analysieren ihre Arbeitsabläufe häufig unzureichend, da dies zu aufwendig ist und Expertenwissen erfordert. Dadurch bleibt ein erhebliches Produktivitätspotenzial ungenutzt, was sich negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirken kann.

Im Forschungsprojekt wurde ein Digitales Assistenzsystem entwickelt, das Montageabläufe mit Hilfe der Daten eines MoCap-Systems schnell, detailliert und produktspezifisch analysieren kann. KMUs können das Digitale Assistenzsystem ohne große Vorbereitungen sofort einsetzen, um ihre Arbeitsplätze und -prozesse zu analysieren und zu verbessern.

Das Digitale Assistenzsystem bietet die Möglichkeit:

- (1) Produktivitäts- und Ergonomieanalysen (teil-)automatisiert durchzuführen, wodurch der Aufwand, das benötigte Expertenwissen und mögliche Analysefehler reduziert werden.
- (2) Analysen zu beschleunigen, sodass Ergebnisse schnell vorliegen und Arbeitsplätze und -prozesse unmittelbar angepasst werden können.

- (3) mehrere Produktivitäts- und Ergonomieanalysen gleichzeitig anhand einer Bewegungsaufnahme durchzuführen, was Zeit spart und die Identifizierung möglicher Wechselwirkungen zwischen Produktivität und Ergonomie erleichtert.
- (4) Analysen individuell durchzuführen, um die Körpermaße und Bewegungsmöglichkeiten des Mitarbeiters zu berücksichtigen und den Arbeitsplatz ergonomisch zu gestalten.
- (5) Analyseergebnisse direkt mit der Anwendungsdomäne wie Stücklisten, Arbeitsplänen oder Bewegungsaufnahmen zu verknüpfen, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde das Digitale Assistenzsystem bei den Projektpartnern evaluiert. Dadurch bestätigte sich der hohe Nutzen des Systems. In Workshops mit Industrial Engineers und Werkern der Unternehmen kam das Digitale Assistenzsystem zum Einsatz, um bestehende Montageabläufe zu analysieren. Auf Grundlage der Ergebnisse konnten vor Ort Maßnahmen abgeleitet und umgesetzt werden, um die Produktivität und Ergonomie zu verbessern. Eine wiederholte Analyse der Montageabläufe zeigte, dass die Effekte der Arbeitsplatz- und Prozessanpassungen direkt messbar sind. Die Einbeziehung der Werker in den gesamten Analyse- und Verbesserungsprozess hatte zudem den positiven Nebeneffekt, dass die Akzeptanz des Digitalen Assistenzsystems und der Veränderungen am Arbeitsplatz stieg.

6 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Die Ergebnisse des Projekts lieferten wichtige Erkenntnisse für Forschung und Wirtschaft. So konnte das Digitale Assistenzsystem in den Unternehmen erfolgreich eingesetzt werden, um Montageabläufe zu analysieren und diese anschließend ergonomischer und produktiver zu gestalten. Den Projektpartnern wurde demonstriert, welche Möglichkeiten aktuelle MoCap-Technologien bieten und wie sie davon profitieren können. Gleichzeitig sind bei der Anwendung des Digitalen Assistenzsystems in der Industrie weitere Ideen zur Weiterentwicklung des Systems entstanden. Dazu zählen beispielsweise die Implementierung eines Maßnahmenkatalogs, um die Interpretation von Analyseergebnissen zu erleichtern, oder die Erweiterung des Systems um weitere Erfassungstechnologien, um komplexere Ergonomieanalysen durchführen zu können oder die Datenaufbereitung zu beschleunigen. Es besteht somit weiterer Forschungsbedarf, der nach der Projektlaufzeit durch spezifisch geplante Transfermaßnahmen realisiert werden soll.

Aufgrund der hohen Beschaffungskosten des MoCap-Systems ist es aktuell eher unwahrscheinlich, dass KMUs das System eigenständig nutzen können. Aus diesem Grund soll das Digitale Assistenzsystem in Zukunft zunächst im Rahmen von Beratungsprojekten bei Unternehmen zum Einsatz kommen.

7 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 7 zeigt die durchgeführten Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit.

Tabelle 7: Durchgeführte Transfermaßnahmen

	Ziel	Rahmen		Zeitraum
Maßnahme A: Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	A1	Industrie 4.0 Management	09/2024
Maßnahme B: Fachkonferenzen	Wissenstransfer durch Vorträge / Vorstellungen auf Fachkonferenzen und Tagungen	B1	WGAB Forschungsseminar 2024	16.09.- 17.09.2024
Maßnahme C: Online-Veröffentlichung	Schnelle und umfassende Informationsverbreitung im Internet	C1	IPMT-Internetseite	seit 02/2024
Maßnahme D: Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Diskussion der Forschungsergebnisse	D1	Projektbegleitender Ausschuss	05/2023 06/2024 12/2024 05/2025
Maßnahme F: Studentische Ausbildung	Projektbezogene Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	F1	Einstellung von wissenschaftlichen Hilfskräften	2023
		F2	Masterarbeit TUHH: „Bestimmung der Sollzeiten von Arbeitsabläufen mit einem Motion-Capture-System“	07/23-01/24
		F3	Masterarbeit TUHH: „Individuelle Bewertung der Arbeitsplatzergonomie mit einem Motion-Capture-System“	11/23-05/24
		F4	Masterarbeit TUHH: „Evaluation eines Digitalen Assistenzsystems zur Analyse von Montageabläufen mit einem Motion-Capture-System“	03/25-11/25
Maßnahme G: Zusätzliche internationale Verbreitung	Verbreitung der Ergebnisse im europäischen Ausland	G1	CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024 (Portugal)	29.05.- 31.05.2024
		G2	CIRP Conference on Manufacturing Systems 2025 (Niederlande)	14.04.- 16.04.2025
			Kontakte und Meetings laufender internationaler F&E-Vorhaben	Ab Projektstart

8 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Tabelle 8 zeigt die geplanten spezifischen Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.

Tabelle 8: Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

	Ziel	Rahmen		Zeitraum
Maßnahme H: Studentische Ausbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	H1	Einbindung von Inhalten in die Vorlesung "Produktivitätsmanagement" an der TUHH	1x im Jahr
Maßnahme I: Weiterbildung / Transfer in die Industrie	Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen	I1 I2	Hausinterne / externe Schulungen Fachkrafausbildung im Rahmen von Fortbildungsmaßnahmen in der IPMT-Modellfabrik	2025 2025
Maßnahme J: Fachkonferenzen	Wissenstransfer durch Vorträge / Vorstellungen auf Fachkonferenzen und Tagungen	J1 J2 J3	WGAB Forschungsseminar 2025 Int. Fachkonferenz (CIRP oder IFIP) MTM-Summit	2025 2026 2026
Maßnahme K: Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften	K1	Industrie 4.0 Management oder ProductivIty Management	2025
Maßnahme L: Online-Veröffentlichung	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Bereitstellung im Internet	L1 L2	Informationsdienst Wissenschaft IPMT-Internetseite	2025 2025
Maßnahme M: Bau eines Demonstrators	Ständige Möglichkeit zur Vorstellung der Ergebnisse	M1	Verbleib eines Demonstrators in der IPMT-Modellfabrik	2025
Maßnahme N: Beratung von Unternehmen	Transfer des Methodenwissen in die Industrie	N1	1. Beratungsprojekt	2025
Maßnahme O: Sonstige Transfermaßnahmen	Einbeziehung eines Multiplikators Wissenschaftliche Arbeit Workshops und Industrie-arbeitskreise	O1 O2 O3	Weiterführende branchenübergreifende Evaluierung der Ergebnisse gemeinsam mit PA-Mitgliedern Verwendung der Ergebnisse im Rahmen von Dissertationen Ergebnistransfer in branchenfremden KMUs	2025 2026 2025

9 Literaturverzeichnis

BAuA (2019): MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2333.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 04.08.2025.

BAuA (2023): Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2022. Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Themen/Monitoring-Evaluation/Zahlen-Daten-Fakten/pdf/Kosten-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 15.07.2025.

Benter, M.; Neumann, M. (2023): Digitale Arbeitsgestaltung mit MTMmotion®. Hg. v. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V.

Bokranz, Rainer; Landau, Kurt (2012): Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Daub; Sarah Gawlick; Florian Blab (2018): Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/aktuelle-forschung/Biomechatronische-Systeme/Ergonomische_Arbeitsplatzgestaltung_IPA2018.pdf.

Deutsche Bundesbank (2025): 6. Produktivität und Lohnkosten in der Gesamtwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bundesbank.de/de/statistiken/statistische-fachreihen/-/6-produktivitaet-und-lohnkosten-in-der-gesamtwirtschaft-805784>, zuletzt geprüft am 15.07.2025.

DGUV (2015): DGUV Bewertung physischer Belastungen gemäß DGUV-Information „ 208-033 (bisher: BGI/GUV-I 7011) (Anhang 3). Online verfügbar unter https://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/ergonomie/pdf/bewertung_physischer_belastungen.pdf.

DGUV (2020): DGUV Report 3/2020: MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz, Band 2. Hg. v. DGUV. Online verfügbar unter <https://publikationen.dguv.de/widets/pdf/download/article/3635>, zuletzt geprüft am 04.08.2025.

Dombrowski, Uwe (2015): Lean Development. Aktueller Stand und Zukünftige Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg (VDI-Buch Ser). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4178893>.

Gorecki, Paweł; Pautsch, Peter (2024): Praxisbuch Lean Management. Der Weg zur operativen Excellence. Unter Mitarbeit von Thorsten Pautsch. 4., aktualisierte Auflage. München: Hanser Carl.

Institut für Arbeitswissenschaft (Hg.) (2010): Ergonomie in der Industrie - aber wie? Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements. Kooperationsprogramm zu normativem Management von Belastungen und Risiken bei körperlicher Arbeit (KoBRA). 1. Aufl. Darmstadt: Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt (IAD).

Kuhlang, Peter; Benter, Martin; Neumann, Maria (2023a): MTM in Motion – Perspectives to Digital Work Design. In: Jochen Deuse (Hg.): How can industrial management contribute to a brighter future?: GITO mbH Verlag, S. 35–53.

Kuhlang, Peter; Mühlbradt, Thomas; Benter, Martin; Neumann, Maria (2023b): Digitalisierung und Internationalisierung der Arbeitswirtschaft für produktive und ergonomiegerechte Basisarbeit in Produktion und Logistik. In: Z. Arb. Wiss. 77 (4), S. 501–514. DOI: 10.1007/s41449-023-00385-3.

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hg.) (2012): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2., Aufl. Berlin: Springer Berlin (VDI-Buch).

Niemann, Jörg (2021): Lean Six Sigma. Methoden Zur Produktionsoptimierung. Unter Mitarbeit von Benedikt Reich und Carsten Stöhr. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg (Springer eBook Collection).

Pöttker, S.; Jansen, T.; Lödding, H. (2024): Analyse von Arbeitsabläufen mit Motion-Capture-Systemen. Lösungs- und Implementierungsprinzipien. In: *Industrie 4.0 Science* (5). DOI: 10.30844/I4SD.24.5.43.

Pöttker, S.; Neumann, M.; Benter, M.; Eckart, C.; Wolf, U.; Lödding, H.; Kuhlang, P. (2025a): Teilautomatisierte Ableitung von MTM-Analysen aus Motion-Capturing-Daten. Evaluation des Vorgehens und Vergleich mit manuell erzeugten MTM-Analysen. In: *Industrie 4.0 Science* (5).

Pöttker, Silas; Benter, Martin; Kuhlang, Peter; Lödding, Hermann (2025b): Rapid and highly detailed productivity analyses for assembly processes using motion capture systems. In: *26th CIRP Design Conference* 134, S. 681–686. DOI: 10.1016/j.procir.2025.02.182.

Pöttker, Silas; Lödding, Hermann (2024): Digital assembly design with a motion capture system. In: *26th CIRP Design Conference* 130, S. 374–380. DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.103.

REFA (2016): Industrial Engineering. Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.

Schlick, Christopher; Bruder, Ralph; Luczak, Holger (2018): Arbeitswissenschaft. 4. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-e-pflicht-1521821>.

Schmidtke, Heinz; Jastrzebska-Fraczek, Iwona (2013): Ergonomie. Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen. München: Hanser; Ciando. Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/471800.

Schuh, G.; Kampker, A.; Franzkoch, B.; Wesch-Potente, C.; Swist, M. (2010): Praxisnahe Montagegestaltung mit Cardboard-Engineering *. In: *wt* 100 (9), S. 659–664. DOI: 10.37544/1436-4980-2010-9-659.

Schünke, Michael; Schulte, Erik; Schumacher, Udo (2022): PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem LernAtlas der Anatomie. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Thieme.

Verein Deutscher Ingenieure; Gesellschaft Produktionstechnik (1980): Handbuch der Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation. Düsseldorf: VDI-Verlag.