



## Mit Bewegungsdaten zu schlankeren Prozessen

In Betrieben mit einem hohen Anteil manueller Tätigkeiten können ineffiziente Arbeitsabläufe zu Gesundheitsproblemen bei Mitarbeitern führen. Studien zufolge machen diese ein Fünftel aller Erkrankungen in der Fertigungsindustrie aus. Die Optimierung von Arbeitsabläufen ist daher entscheidend. War diese bisher jedoch meist aufwendig, stehen dank neuer Lösungsprinzipien und Motion-Capture-Systemen Ansätze zur Verfügung, mit denen sich passende Digitale Assistenzsysteme einfacher konzipieren lassen.

### Schlüsselwörter

Motion-Capture-Systeme, Digitale Assistenzsysteme, digitale Produktion, Industrie 4.0, Internet der Dinge, Cyber-Physische Systeme



**Silas Pöttker, M.Sc.** arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg im Bereich Produktivitätsmanagement.



**Tim Jansen, M.Sc.** arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg im Bereich Digitales Produktionsmanagement.



**Prof. Dr.-Ing. Hermann Lödning** leitet das Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg.

### Kontakt

ipmt@tuhh.de  
www.tuhh.de/ipmt

DOI: 10.30844/I4SD.24.5.43

# Analyse von Arbeitsabläufen mit Motion-Capture-Systemen

## Lösungs- und Implementierungsprinzipien

Silas Pöttker, Tim Jansen, Hermann Lödding, Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg

Die Doppelte Transformation beschreibt den erforderlichen Wandel der Wirtschaft in den Dimensionen Ökologie und Digitalisierung. Motion-Capture-Systeme bieten neue Möglichkeiten, um Arbeitsabläufe in der industriellen Montage zu erfassen und zu analysieren. Sie stellen Bewegungsabläufe hochfrequent, präzise und hochauflösend dar. Es stellt sich daher die Frage, wie die Technologie im Rahmen der Digitalen Transformation genutzt werden kann, um die Analyse von Arbeitsabläufen und die Gestaltung von Arbeitsplätzen weiterzuentwickeln. Unser Beitrag diskutiert dies anhand von Lösungsprinzipien und beschreibt Implementierungsprinzipien für die Entwicklung zukünftiger Digitaler Assistenzsysteme.

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 [1]. Die Analyse von Arbeitsabläufen ermöglicht es, Verbesserungspotenziale zu identifizieren und Maßnahmen zur Gestaltung von Arbeitsabläufen abzuleiten. Diese Aufgabe wird traditionell vom Industrial Engineering durchgeführt. Detaillierte Analysemethoden sind jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden und können oft nur von geschultem Personal durchgeführt werden, da sie anwendungsspezifisch eingesetzt werden. Motion-Capture-Systeme (MoCap-Systeme) bieten die Möglichkeit, Bewegungen zu erfassen und zu analysieren, um ihre Ergonomie und Produktivität zu beurteilen. Bisherige Ansätze, z. B. von [2] oder [3-5], nutzen Bewegungsdaten vor allem, um etablierte Analysemethoden zu automatisieren. MoCap-Systeme bieten jedoch über die

Automatisierung hinaus weitere Potenziale. In diesem Beitrag werden auf Basis des aktuellen Forschungsstandes Lösungsprinzipien für den Einsatz von MoCap-Systemen vorgestellt. Die Lösungsprinzipien bilden eine Grundlage für die Entwicklung neuer Methoden. Um diese Methoden nutzen zu können, stellen wir Implementierungsprinzipien für die Entwicklung von Digitalen Assistenzsystemen vor, mit denen Daten ausgewertet und visualisiert werden können [6].

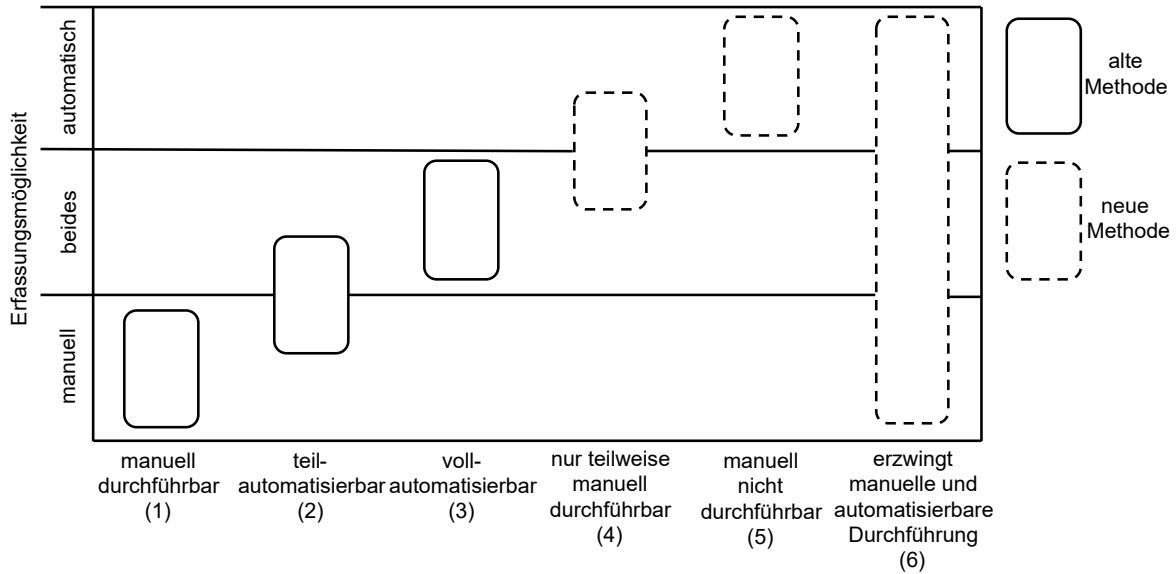
## Analysemethoden und Motion-Capture-Systeme

Arbeitsabläufe sollten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ergonomischer Aspekte entwickelt werden [7]. Produktivitätsanalysen wie z. B. das Methods-Time-Measurement-Verfahren (MTM-Verfahren) oder Primär-Sekundär-Analysen können eingesetzt werden, um effiziente und verschwendungsfreie Arbeitsprozesse zu gestalten [8, 9]. Auf der anderen Seite werden Ergonomieanalysen wie die RULA-Methode genutzt werden, um Belastungen am Arbeitsplatz zu bewerten und zu reduzieren und somit die Arbeit menschengerecht zu gestalten. Um die genannten Analysen durchführen zu können, werden menschliche Bewegungsdaten benötigt. Zur schnellen und automatisierten Erfassung bietet sich der Einsatz von MoCap-Systemen an [10]: MoCap-Systeme werden verwendet, um Bewegungen von Objekten oder Menschen zu erfassen und aufzuzeichnen [11]. Beim Motion-Capturing wird ein Mensch mit Sensoren oder Markern versehen, deren Position und bei einigen Techniken auch die Orientierung verfolgt werden kann [12]. In der Industrie werden MoCap-Systeme vorwiegend eingesetzt, um die Gesundheit von Arbeitnehmern zu schützen und um ihre Sicherheit zu verbessern [11]. Es gibt verschiedene Techniken der Bewegungserfassung, wie z. B. optische, elektromechanische, elektromagnetische und akustische Systeme [12]. Die präzise und hochauflösende Darstellung von Bewegungsabläufen durch MoCap-Systeme legt nahe, die Methoden zur Analyse von Arbeitsabläufen zu automatisieren.



Die ORCID-Identifizierungsnummern der Autoren dieses Beitrags sind einsehbar unter <https://doi.org/10.30844/I4SD.24.5.43>

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die die Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird.

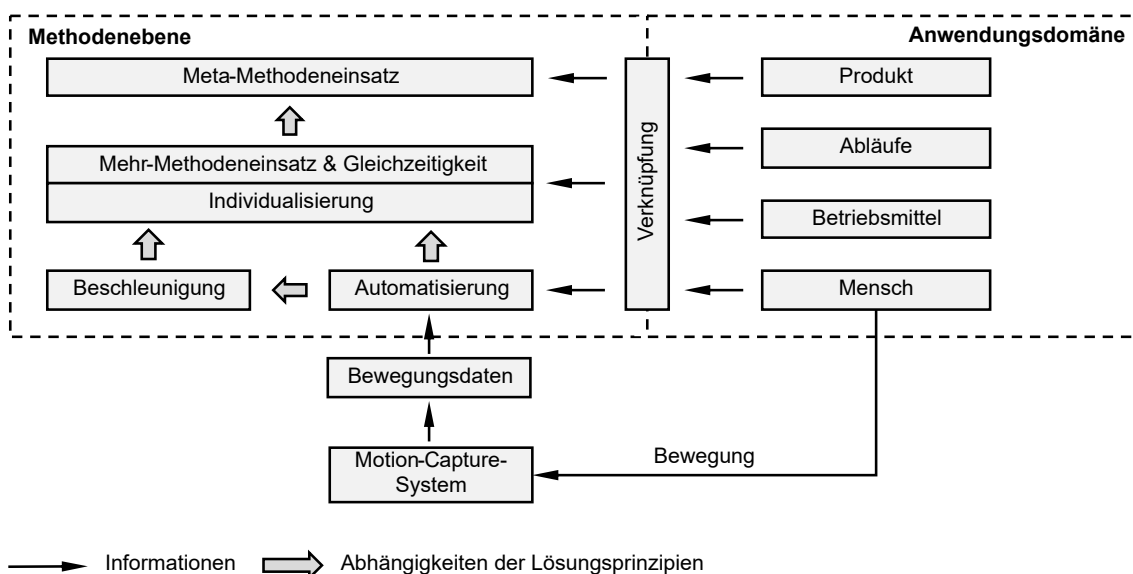


**Bild 1:** Klassifizierung von Methoden nach manueller und automatisierter Erfassung.

Die oben genannten Analysemethoden wurden zu einer Zeit entwickelt, als es noch keine breite Verfügbarkeit von leistungsfähigen MoCap-Systemen gab, und sind für die manuelle Durchführung konzipiert (vgl. (1)). **Bild 1** stellt die Erfassungsmöglichkeiten (differenziert nach manueller und automatischer Erfassung) dem Datenbedarf der Methoden gegenüber und leitet daraus sechs Klassen ab. Einige Analysemethoden können nicht vollständig durch MoCap-Systeme automatisiert werden (Klassen 1, 2 und 6), weil sie Informationen benötigen,

die nicht automatisch erfassbar sind oder subjektives Expertenwissen erfordern. Um diesem Problem zu begegnen, muss entweder die Technik erweitert oder die bestehende Methode so angepasst werden, dass sich der erforderliche Datenbedarf verringert. Eine andere Strategie besteht darin, die Möglichkeiten der MoCap-Systeme zu nutzen, um neue Methoden zu entwickeln. Dies erschließt bisher ungenutzte Potenziale, kann aber dazu führen, dass die Methoden nur noch teilweise oder nicht mehr manuell durchführbar sind (**Bild 1** (4, 5, 6)). Benö-

**Bild 2:** Sechs Lösungsprinzipien für den Einsatz von MoCap-Systemen.



tigen Methoden sowohl nur manuell erfassbare als auch nur automatisch erfassbare Eingabedaten, erzwingt dies die Kombination einer automatischen und einer manuellen Datenerfassung (**Bild 1** (6)).

## Lösungsprinzipien für bewegungserfassungsbasierte Analysemethoden

In diesem Kapitel werden sechs Lösungsprinzipien für den Einsatz von MoCap-Systemen zur Analyse von Arbeitsabläufen und Gestaltung von Arbeitsplätzen vorgestellt und anhand von Beispielen aus der Literatur verdeutlicht. **Bild 2** zeigt die Lösungsprinzipien und ihre Informationsbasis.

In Anlehnung an das Arbeitssystemmodell nach REFA zeigt die rechte Seite von **Bild 2** die Systemelemente der Anwendungsdomäne, die eine Informationsbasis für die Lösungsprinzipien bereitstellen [7]. Die linke Seite stellt die Methodenebenen mit den Lösungsprinzipien und ihren Abhängigkeiten dar. Der untere Teil zeigt, dass es zur Umsetzung der sechs Lösungsprinzipien notwendig ist, menschliche Bewegungen mit einem Motion-Capture-System zu erfassen.

### Automatisierung

MoCap-Systeme bieten die technologische Möglichkeit, bestehende Lösungen zu automatisieren. Dadurch können Analysen schneller und effizienter durchgeführt und ausgewertet werden, wodurch der Aufwand verringert wird. Die Ergebnisse der Analysen sind zudem zuverlässig, da manuelle Auswertungsfehler durch die Automatisierung begrenzt werden können. Diese Vorteile gelten auch für die anderen fünf Lösungsprinzipien, da sie alle auf der Automatisierung aufbauen. Es gibt viele Beispiele für Assistenzsysteme, die bestehende Lösungen automatisieren. So hat [2] eine Methodik zur Produktivitätsanalyse für manuelle Arbeitsabläufe entwickelt, die ein optisches MoCap-System zur Bewegungserfassung verwendet. Ziel der Methodik ist es, Ist-Zeiten zu erfassen und Plan-Zeiten auf Basis der MTM-Methodik zu ermitteln, um darauf aufbauend Produktivitätspotenziale zu identifizieren [2]. Im Bereich der Ergonomie werden MoCap-Systeme vorwiegend eingesetzt, um Verfahren zur Bewertung von Körperhaltungen zu automatisieren [3-5].

### Beschleunigung

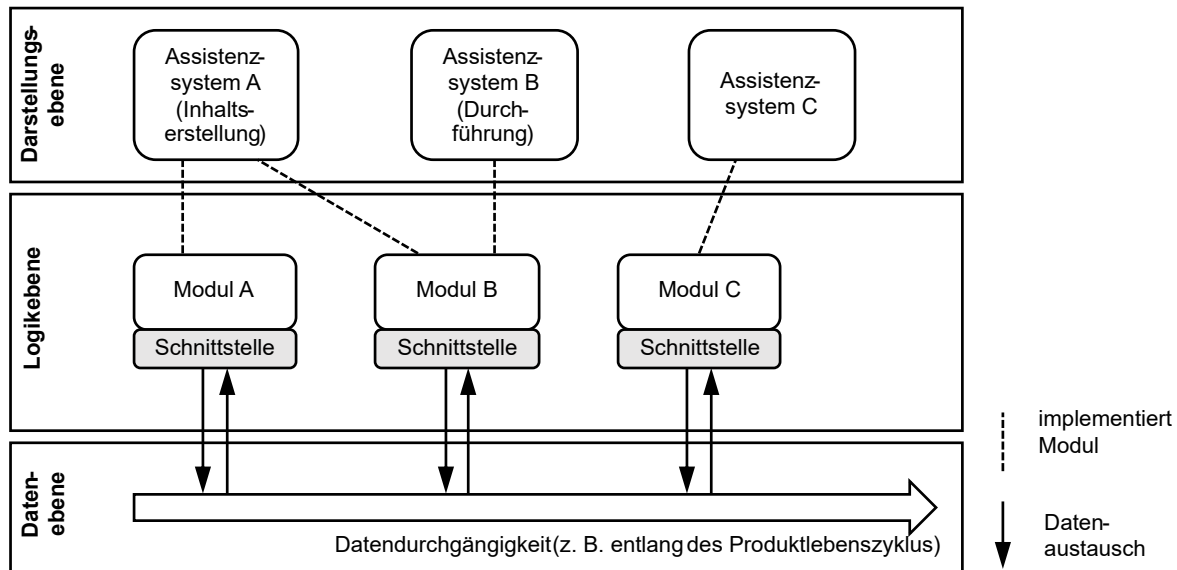
Eine Automatisierung mit Motion-Capture-Systemen beschleunigt Analysen. Durch die schnelle Bereitstellung der Analyseergebnisse können Unternehmen schnell die Ursachen für Probleme identifizieren und wirksame Maßnahmen ableiten und umsetzen, um Arbeitsplätze und -prozesse zu gestalten und zu verbessern. Beispielsweise erfordert ein manuell umgesetztes MTM-1-Verfahren aufgrund

seines hohen Detaillierungsgrades einen erheblichen Analyseaufwand. Für die Analyse einer einminütigen Bewegungssequenz im MTM-1-Grundverfahren werden etwa 200 Minuten benötigt [13]. Im Gegensatz dazu beträgt der manuelle Aufwand für die von Benter entwickelte Gesamtmethodik im ungünstigsten Fall etwa 50 Minuten für eine einminütige Bewegungssequenz, wobei hier von einer maximalen Dauer von 30 Minuten für die Positionierung des optischen MoCap-Systems und einer schlechten Erfassungsgüte ausgegangen wird. Des Weiteren ist die Positionierung nur einmal erforderlich, unabhängig von der Dauer der Aufnahme [2]. Im Bereich der Ergonomie gibt es Anwendungsfälle, bei denen die Analyseergebnisse in Echtzeit verfügbar sind. Ein Ansatz ist, die erfassten Bewegungsdaten mit den in Normen festgelegten Werten zu vergleichen. Dadurch können beispielsweise Hinweise über Fehlhaltungen gewonnen werden, die eine direkte Anpassung des Arbeitsplatzes ermöglichen [14].

Das Lösungsprinzip der Beschleunigung ermöglicht es einerseits, Methoden in Anwendungsbereichen anzuwenden, für die dies bisher unwirtschaftlich war, und andererseits, komplexe Analysen schnell durchzuführen. Darüber hinaus werden neue Anwendungsbereiche erschlossen, für die eine manuelle Analyse zu langsam ist. Als Beispiel hierfür dient unser Forschungsprojekt Cardboard-Track, bei dem wir ein elektromechanisches MoCap-System in Verbindung mit einem Digitalen Assistenzsystem nutzen, um im Cardboard Engineering (CE) unter anderem MTM-Analysen durchführen zu können und zeitnah Ergebnisse zu erhalten [6].

### Mehr-Methodeneinsatz und Gleichzeitigkeit

Die hohe Erfassungs- und Verarbeitungsgeschwindigkeit der MoCap-Systeme erlaubt es, mehrere Methoden aus unterschiedlichen Bereichen wie der Ergonomie und Produktivität gleichzeitig anzuwenden. Dies ermöglicht es beispielsweise, den Zeitaufwand einer Bewegung zu ermitteln und gleichzeitig die dabei eingenommenen Körperhaltung ergonomisch zu bewerten. Dies unterscheidet sich deutlich von der bisherigen Praxis, unterschiedliche Methoden sequentiell anzuwenden. Eine isolierte und sequentielle Anwendung von Analysemethoden unterschiedlicher Fachgebiete hat außerdem den Nachteil, dass mögliche Wechselwirkungen zwischen ihnen nicht erkannt werden. Das Prozessbaukastensystem MTM-Human Work Design (HWD) ist eine Methode, die eine gleichzeitige Analyse der Produktivität und Ergonomie ermöglicht. Der hohe manuelle Aufwand der MTM-HWD-Methode kann durch die Verwendung von Bewegungsdaten des Menschen reduziert werden. In einer aktuellen Studie wurde beispielsweise ein Human Simulation Tool eingesetzt, um Bewegungsdaten für die MTM-HWD-Analyse zu generieren [15]. Im Forschungsprojekt CardboardTrack wird das Lösungsprinzip des Multimethodeneinsatzes und der Gleichzeitigkeit umgesetzt, indem die Produktivität und Ergonomie mit mehreren unterschiedlichen Methoden analysiert



**Bild 3:** Implementierungsprinzipien für die Entwicklung digitaler Assistenzsysteme.

und die Ergebnisse auf verschiedenen Detailebenen visualisiert werden können [6].

### Individualisierung

Die individuellen Körpermaße und Fähigkeiten sind für ergonomische Fragestellungen von besonderer Bedeutung. Ein Arbeitsplatz sollte ergonomischen Grundsätzen entsprechen und die individuellen Körpermaße und Bewegungsmöglichkeiten des Menschen berücksichtigen [9]. MoCap-Systeme bieten die Möglichkeit, die Bewegungsfähigkeiten von Mitarbeitern schnell, präzise und aufwandsarm zu erfassen. Auch wenn Verfahren zur Bewertung von Belastungen automatisiert und individualisiert werden, ist häufig noch Expertenwissen erforderlich, um die Ergebnisse zu interpretieren und Maßnahmen abzuleiten. Mit Hilfe eines elektromechanischen MoCap-Systems hat [16] eine Methodik entwickelt, um die individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter mit den Anforderungen des Arbeitsplatzes zu verknüpfen. Dadurch wird die Arbeitsplatzbelastung mitarbeiterindividuell analysiert. Auf der Basis der Ergebnisse definiert [16] Maßnahmen je nach Belastungsart und Körperregion. Dadurch kann die Methode auch von Mitarbeitern ohne ergonomische Fachkenntnisse angewendet werden [16]. Zwar fehlen Erkenntnisse zu individuellen Produktivitätsanalysen mit MoCap-Systemen. Es wäre jedoch denkbar, ein individuelles MTM-Verfahren zu entwickeln, um beispielsweise Vorgabezeiten für Menschen mit körperlichen Einschränkungen zu ermitteln.

### Verknüpfung mit der Anwendungsdomäne

Um eine möglichst breite Anwendung zu ermöglichen, werden Methoden meist ohne einen konkreten Anwendungsbezug entwickelt und dokumentiert, z. B. gelten

sowohl MTM-Normzeittabellen als auch ergonomische Grenzwerte nach [17] sinnvollerweise unabhängig von einem konkreten Arbeitsablauf. Da MoCap-Systeme die Daten in digitaler Form bereitstellen und diese auf Rechnern ausgewertet werden können, bietet es sich an, Analysen mit bereits existierenden domänenspezifischen Daten, wie beispielsweise Stücklisten und Arbeitsplänen, zu verknüpfen. Dadurch stehen Informationen wie das Gewicht der Werkstücke zur Verfügung, was den Aufwand für die manuelle Eingabe dieser Daten reduziert. Ein weiterer Nutzen der Verknüpfung ist der vereinfachte Bezug zum Anwendungsfeld. Es kann z. B. eine Bewegung einem Werkstück zugeordnet oder der Montagefortschritt mit dem 3D-Modell des Produkts visualisiert werden. Dies ermöglicht eine strukturierte Dokumentation der Daten, sodass sie für andere Funktionen zur Verfügung stehen. Im Forschungsprojekt CardboardTrack werden die Montagevorgänge dynamisch aus der Stückliste des zu montierenden Produkts generiert und mit Informationen zu Mitarbeitern und Betriebsmitteln sowie mit Bewegungsdaten und Analyseergebnissen verknüpft [6].

### Meta-Methodeneinsatz

Meta-Methoden basieren auf den Ergebnissen mehrerer Methoden, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Dies könnte zum Beispiel ein Leitfaden sein, der auf der Grundlage der Ergebnisse mehrerer Methoden Handlungsempfehlungen gibt, um systematische Verbesserungen zu ermöglichen. In unserem Forschungsprojekt CardboardTrack ist die Idee eine Meta-Methode zu entwickeln, mit der aus den Ergebnissen von Ergonomie- und Produktivitätsanalysen die Bereiche mit dem größten Optimierungspotenzial ermittelt werden können.

Die Lösungsprinzipien können zur Entwicklung neuer Methoden verwendet werden. Der folgende Abschnitt beschreibt informationstechnische Prinzipien für die Implementierung der Methoden in Digitalen Assistenzsystemen.

## Implementierungsprinzipien

Die Implementierungsprinzipien orientieren sich an den Grundsätzen moderner Softwarearchitekturen, z. B. [18, 19]. Sie gelten für Digitale Assistenzsysteme in der Produktion und eignen sich auch für die Einbindung von MoCap-Systemen. **Bild 3** zeigt die Implementierungsprinzipien und wie sie zusammenwirken. Durch die Unterteilung in Daten-, Logik- und Darstellungsebene wird eine Entkopplung der Systembestandteile erreicht. Auf der Datenebene wird durch eine vereinheitlichte Datenhaltung eine Datendurchgängigkeit verfolgt, z. B. entlang des Produktlebenszyklus. Innerhalb der Logikebene wird das Konzept der Microservices eingesetzt, um einzelne Logikmodule unabhängig voneinander entwickeln und bereitstellen zu können. In [6] nutzen wir Microservices, um Produktivitäts- und Ergonomieanalysen durchzuführen. Die Assistenzsysteme mit den anwendungsspezifischen Benutzerschnittstellen befinden sich auf der Darstellungsebene und implementieren die jeweils erforderlichen Module auf der Logikebene.

### Modularisierung

In der Softwareentwicklung beinhaltet Modularisierung das Prinzip der Trennung von Zuständigkeiten (Separation of Concerns), was bedeutet, dass jedes Modul nur eine bestimmte Funktion erfüllen sollte. Ein Modul selbst integriert in hohem Maße voneinander abhängige Aspekte, was zu einer hohen Kohäsion führt. Darüber hinaus wird empfohlen, dass die Abhängigkeiten zwischen den Modulen gering sein sollten, was zu einer geringen Kopplung führt. Dieses Implementierungsprinzip kann zur Standardisierung und Wiederverwendung von Modulen in verschiedenen Assistenzsystemen beitragen. Eine Vereinfachung der einzelnen Module kann wiederum die Verständlichkeit verbessern, insbesondere in kollaborativen Entwicklungsumgebungen. Für die Kommunikation zwischen verschiedenen Modulen ist allerdings eine klar definierte Schnittstelle erforderlich. Sie ermöglicht eine konsistente Implementierung der Module in den Assistenzsystemen, auch wenn sich die Logik innerhalb der Module ändert. Dies ist insbesondere in dynamischen Umgebungen mit sich ändernden Anforderungen während der Entwicklungsphase von Vorteil.

Ferner reduziert die Aufteilung der Assistenzsystemlogik in gekapselte Module den Wartungsaufwand und ermöglicht bei Bedarf eine Skalierbarkeit. Ein Assistenzsystem für Ergonomie- und Produktivitätsanalysen kann z. B. Module enthalten für: (1) die Erfassung von Bewegungsdaten, (2) die Auswertung von Ergonomieparametern aus Bewegungsdaten, (3) die Auswertung von

Produktivitätsparametern aus Bewegungsdaten, (4) die Visualisierung des Montageprozesses anhand von CAD- oder 3D-Modellen. Durch eine klar definierte Schnittstelle kann z. B. die Art der Bewegungserfassung geändert werden, ohne dass die Module zur Auswertung und Visualisierung angepasst werden müssen.

### Datendurchgängigkeit

Ziel der Datendurchgängigkeit ist die Harmonisierung aller Daten, die von Modulen oder Assistenzsystemen während des gesamten Produktlebenszyklus erzeugt oder verwendet werden. Die horizontale Integration ermöglicht die Weiterverwendung von Daten in nachgelagerten Phasen des Produktlebenszyklus. Synergien können genutzt werden, indem Assistenzsysteme auf Inhalte und Daten zugreifen können, die bereits in vorgelagerten Assistenzsystemen erzeugt wurden, z. B. um Bewegungsabläufe mit Sachnummern zu verknüpfen. Dadurch kann die Notwendigkeit, anwendungsspezifische Inhalte zu erstellen, reduziert oder sogar vermieden werden. Um die Referenzierung von Daten zu erleichtern, ist es wichtig, dass alle Daten mit einer eindeutigen ID versehen werden. Darüber hinaus kann die Datendurchgängigkeit neue Dienste und Funktionen ermöglichen, die über die bestehenden Daten und Module hinausgehen.

### Ökosystem von Assistenzsystemen

In vielen Fällen ist ein Assistenzsystem auf Eingangsdaten und Inhalte angewiesen, die erst erstellt werden müssen, um die Durchführung von Tätigkeiten zu unterstützen. Auch dieser Prozess der Inhaltserstellung kann durch vorgelagerte Assistenzsysteme unterstützt werden. Neben der Optimierung des Arbeitsablaufs können die Daten und Inhalte für eine spätere Verwendung aufbereitet werden. Durch das oben beschriebene Prinzip der Datendurchgängigkeit können die in einem Assistenzsystem erstellten Daten und Inhalte ohne Kompatibilitätsprobleme in nachgelagerten Assistenzsystemen verwendet werden. Durch die Vernetzung dieser Assistenzsysteme kann ein Ökosystem von Assistenzsystemen entstehen. Beispielsweise könnte eine Ergonomieanalyse die Ergebnisse einer nach der MTM-Logik strukturierten Zeitaufnahme von Bewegungsabläufen verwenden. Diese Idee wird im Rahmen des Forschungsprojekts CardboardTrack verfolgt, dessen Ziel darin besteht, Verbesserungen bei der Arbeitsplatz- und Prozessgestaltung zu erreichen [6]. Weitere Anwendungsbeispiele wurden hauptsächlich für die maritime Industrie entwickelt. Beispielsweise erfasst ein Montageassistenzsystem implizit den Montagestatus von Komponenten und Modulen. Diese Informationen sind unter anderem für die Planung und Durchführung der Inbetriebnahme sowie für die entsprechenden Assistenzsysteme sehr hilfreich [20].

### Benutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle ist der wichtigste Interaktionspunkt zwischen dem Anwender und dem Assistenzsystem

und sollte daher im Hinblick auf eine hohe Akzeptanz gestaltet werden. Die in [18] beschriebene Entkopplung von Darstellungs-, Logik- und Datenebene ermöglicht die Entwicklung anwendungsspezifischer Assistenzsysteme mit relativ geringem Aufwand. Dies erlaubt einen hohen Grad an Informationsintegration aus verschiedenen Modulen innerhalb einer einzigen Benutzerschnittstelle und damit eine optimierte und anwendungsspezifische Informationsbereitstellung. Darüber hinaus ermöglicht die Umsetzung als responsive Webanwendung eine geräte- und betriebssystemunabhängige Nutzung der Assistenzsysteme. Dies trägt dazu bei, Hürden für einen breiten Einsatz von Assistenzsystemen zu überwinden. Im Forschungsprojekt CardboardTrack können mit Hilfe eines webbasierten Digitalen Assistenzsystems ein Motion-Capture-System konfiguriert und anschließend Ergonomie- und Produktivitätsanalysen durchgeführt werden [6].

*Dieser Artikel ist im Rahmen des Forschungsprojekts CardboardTrack entstanden, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wird (Projekt Nr. 22591 N).*

## Literatur

- [1] BAuA: Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2022. URL: [www.baua.de/DE/Themen/Monitoring-Evaluation/Zahlen-Daten-Fakten/pdf/Kosten-2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.baua.de/DE/Themen/Monitoring-Evaluation/Zahlen-Daten-Fakten/pdf/Kosten-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4), Abrufdatum 10.06.2024.
- [2] Benter, M.: Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras, Dissertation, TU Hamburg IPMT. Hamburg 2018.
- [3] Gudehus, M.: Entwicklung eines Verfahrens zur ergonomischen Bewertung von Montagetätigkeiten durch Motion-Capturing. Dissertation, Universität Kassel. Kassel 2009.
- [4] Nowara, R. u. a.: Testing the Level of Agreement Between Two Methodological Approaches of the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) for Occupational Health Practice-An Exemplary Application in the Field of Dentistry. In: *Bioengineering* 10 (4), 2023.
- [5] García-Luna, M. A. u. a.: Transparency as a Means to Analyse the Impact of Inertial Sensors on Users During the Occupational Ergonomic Assessment: A Systematic Review. In: *Sensors* 24 (1), 2024.
- [6] Pöttker, S.; Lödding, H.: Digital Assembly Design with a Motion Capture System: 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024. In publication.
- [7] REFA: Arbeitsorganisation erfolgreicher Unternehmen: Wandel in der Arbeitswelt. München 2016.
- [8] Bokranz, R.; Landau, K.: Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM. Band 1: Konzept. Stuttgart 2012.
- [9] Lotter, B.: Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg 2012.
- [10] Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J.: Homo Sapiens Digitalis: Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Berlin, Heidelberg 2016.
- [11] Menolotto, M. u. a.: Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. In: *Sensors* 20 (19), 2020.
- [12] Jackèl, D.; Neunreither, S.; Wagner, F.: Methoden der Computeranimation. Berlin, Heidelberg 2006.
- [13] Hodic, L.: Entwicklung der Zeitdaten-Backend-Methode für die Verarbeitung betrieblicher Prozessdaten zu Planzeiten. Dissertation, TU Chemnitz IBF, Chemnitz 2005.
- [14] Scalefit: Mit Biomechanik zu gesunder Arbeit: Ergonomie ist messbar. In: *ASU: Zeitschrift für medizinische Prävention* 53 (7), 2018.
- [15] Kuhlang, P.; Benter, M.; Neumann, M.: Bridging the Gap Between Digital Human Simulation to Standard Performance with Human Work Design. In: *Smart, Sustainable Manufacturing in an Ever Changing World*. 2023.
- [16] Brosche, J.: Nutzung von Motion-Capture-Technologien zur individuellen Ergonomieanalyse in der Produktion. Dissertation, TU Hamburg IPMT. Hamburg 2023.
- [17] International Organization for Standardization (ISO): ISO 11226:2000-12. Ergonomics: Evaluation of Static Working Postures. 2000.
- [18] Fowler, M.: Patterns of Enterprise Application Architecture. Boston 2003.
- [19] Richards, M.; Ford, N.: Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach. 2020.
- [20] Jansen, T. M. u. a.: Streamlining the Execution of Maritime Commissioning with a Digital Assistance System. In: *Advances in Production Management Systems (APMS): Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Future*. Cham 2023.

Die richtige Software zur Lösung  
Ihrer Herausforderungen

# Das Factory Innovation Suchportal

Treffen Sie die richtige Auswahl  
rund um Industrie 4.0,  
Smart Factory und IIoT



**FACTORY  
INNOVATION**

Agil und smart mit Industrie 4.0