22. AALE-Konferenz
Rosenheim, 25.–27. Februar 2026

Integration von Vitalparametern in virtuelle Umgebungen als adaptive Schnittstellen für sozio-cyberphysische Systeme

N. Günther[1], T. Federsel[1], J. Reiff-Stephan[1]

Abstrakt

Die vorliegende Arbeit präsentiert ein redundantes System, das Vitalparameter als Schnittstelle zwischen physischen Entitäten und virtuellen Repräsentationen in Unity verbindet. Die Echtzeiterfassung physiologischer Parameter wie der Herzfrequenz (EKG), der Hautleitwert (EDA) oder der Muskelaktivität (EMG) ermöglicht die Übertragung der jeweiligen physiologischen Zustände in virtuelle Modelle. Diese neuartige Form der Interaktion zwischen Mensch und Maschine eröffnet ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. Der präsentierte Ansatz mittels EMG gewährleistet durch redundante Signalverarbeitung eine robuste Kommunikation zwischen physischer und virtueller Ebene und erweitert die Möglichkeiten von Digitalen Zwillingen [1], [2] um eine physiologisch fundierte Dimension als Beschreibungselement für sozio-kognitive Entitäten.

Stichwörter

Vitalparameter, Unity, sozio-cyberphysische Produktionssysteme, virtuelle Entitäten, digitale Menschmodelle

1 Einleitung

Die Integration von Vitaldaten zur Ansteuerung von digitalen Repräsentanzen (Avatare) in den Modellierungswerkzeugen ermöglicht adaptive und immersive Interaktionen, welche nicht nur einen Beitrag zur technischen Effizienz leisten, sondern auch die Akzeptanz bei den Nutzern fördern und das Wohlbefinden steigern können [3]. Stress, kognitive Belastung oder Ermüdung könnten in Echtzeit erkannt und in virtuelle Produktionsumgebungen zurückgespiegelt werden, wodurch sich Systeme dynamisch an den Zustand der Nutzer (sozio-kognitive Entitäten) anpassen. Dies eröffnet Potenziale für eine präzisere Analyse von Interaktionsdynamiken, die Gestaltung menschzentrierter Assistenzsysteme und die Prävention gesundheitlicher Belastungen im industriellen Kontext.

Der hier dargelegte Ansatz leistet einen Beitrag zur Weiterentwicklung sozio-cyberphysischer Systeme, indem er physiologische und emotionale Aspekte integriert und somit eine neue Ebene der Mensch-Maschine-Kommunikation schafft [4]. Er adressiert die zentrale Herausforderung einer zuverlässigen Signalverarbeitung von Vitalparametern und fördert ein tieferes Verständnis der soziotechnischen Dynamik. Auf dieser Grundlage ist die Entwicklung adaptiver, menschzentrierter Systeme möglich, die gezielt auf die Bedürfnisse und Zustände der Nutzer reagieren und somit die Interaktion im Kontext von Industrie 5.0 optimieren. Die Abbildung 1 stellt hierfür den Integrationsverlauf der Vitalparameter vom sozio-kognitiven-System ins virtuelle System dar und beschreibt dabei den Fokus des untersuchten Ansatzes [5].

[1] Technische Hochschule Wildau, FG: iC3@Smart Production, Hochschulring 1, 15745 Wildau

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

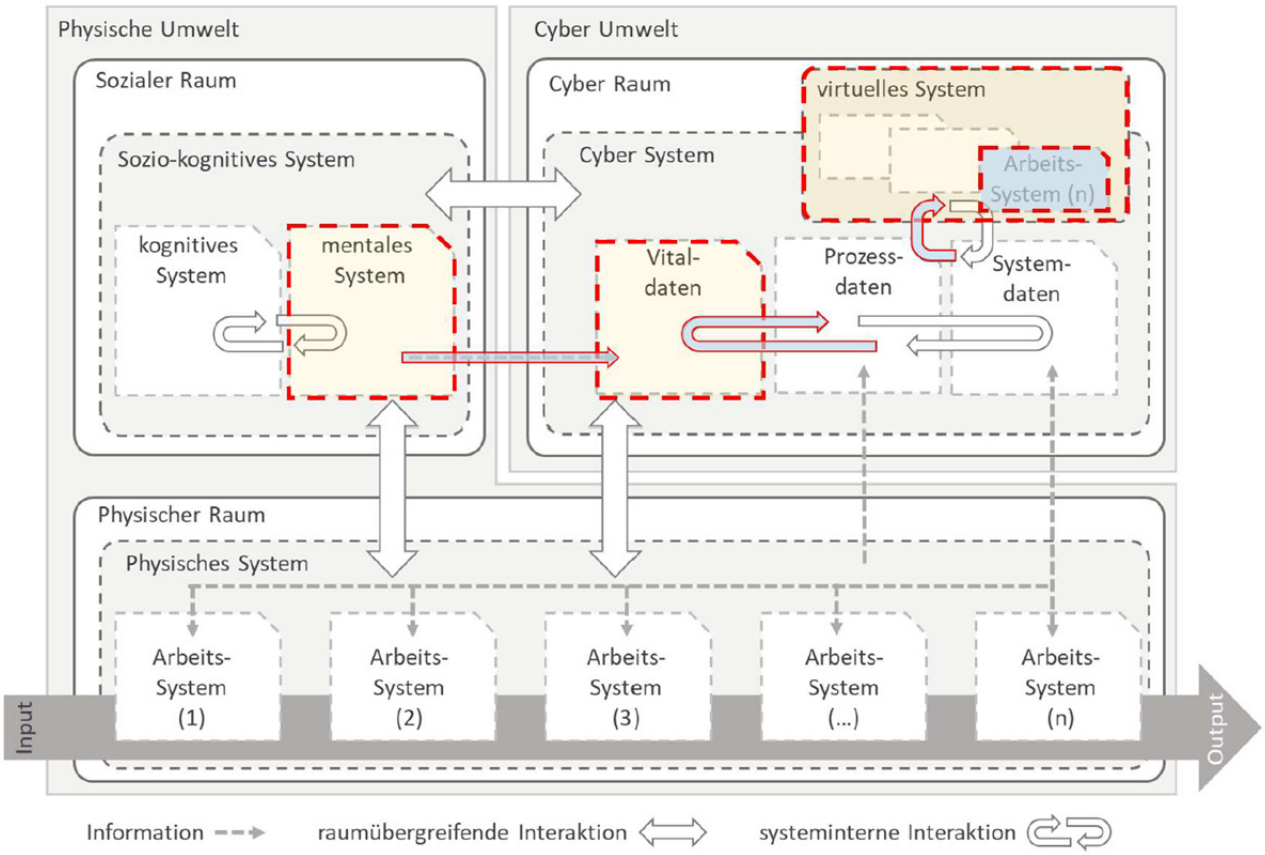

Abbildung 1: Einbettung des Beitrages im sozio-cyberphysischen Produktionssystem nach Günther et al. [5]

2 Menschzentrierung für virtuelle Modelle in sozio-cyberphysische Produktionssystemen

Der Einsatz digitaler Technologien ermöglicht durch den Wegfall physisch bedingter Verzögerungen, etwa infolge eingeschränkter Hardwareverfügbarkeit, personeller Ressourcen oder materiallogistischer Prozesse, eine signifikante Beschleunigung sämtlicher Phasen des Fertigungsprozesses. Insbesondere die Bereiche Design, Entwicklung, Test und Wartung lassen sich effizienter gestalten, wodurch die Flexibilität und Reaktionsfähigkeit moderner Produktionssysteme nachhaltig erhöht werden [6].

Die Forschung zu digitalen Zwillingen ist dabei durch eine ausgeprägte Interdisziplinarität gekennzeichnet. Es sind insbesondere nicht-klinische Wissenschaftsdisziplinen wie Bioingenieurwesen, Robotik und Kybernetik, Mathematik, Biophysik, Mechanik sowie High-Performance-Computing, die wesentlichen Beiträge zur methodischen und technologischen Weiterentwicklung digitaler Zwillinge leisten, insbesondere im Kontext medizinischer Anwendungen [7]. Darüber hinaus besitzen digitale Zwillinge ein erhebliches Potenzial zur Transformation intelligenter Fertigungssysteme durch Echtzeitüberwachung, adaptive Prozessoptimierung und verbesserte Kollaboration. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad gewinnt die gezielte Einbindung des Menschen jedoch an Signifikanz. In der Konsequenz sollte der Fokus zukünftiger Entwicklungen auf der Integration digitaler Zwillinge in Mensch-Maschine-Schnittstellen liegen, um Entscheidungsprozesse sowie die Zusammenarbeit in hybriden Produktionsumgebungen effektiv zu unterstützen [8].

In der Medizin werden physikalisch-physiologische Computermodelle eingesetzt, um therapierelevante Zustände zu simulieren und daraus klinische Vorhersagen abzuleiten. In diesem Zusammenhang ist eine Differenzierung zwischen klassischen, hypothesengetriebenen Simulationsansät-

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

zen mit vordefinierten Anfangsannahmen und datengetriebenen digitalen Zwillingen, die kontinuierlich auf Basis patientenspezifischer Daten aktualisiert werden, erforderlich. Der Aufbau und die Implementierung digitaler Zwillinge sollten dabei konsequent zielorientiert erfolgen, da die angestrebten Ergebnisse die Anforderungen an Datenverfügbarkeit, Modellstruktur und Aktualisierungsmechanismen maßgeblich bestimmen. Die technische Realisierung erfordert die Integration heterogener Technologien, wobei kommerzielle, modulare oder hybride Lösungsansätze verfolgt werden können. [9]

Die Realisierung eines vollwertigen digitalen Zwillings, beispielsweise in der perioperativen Medizin, unterliegt besonders hohen Anforderungen an valide, hochauflösende und multimodale Datenquellen. Zu den relevanten Variablen zählen Biosignale, Medikations- und Labordaten, demografische Variablen sowie standardisierte klinische Interventionen. Diese Datenbasis ermöglicht die Anwendung datenintensiver Modellierungsansätze. Die dokumentierten Interventionen sowie deren hochfrequent erfasste physiologische Effekte stellen dabei eine strukturierte Beeinflussung der Physiologie dar und sind von zentraler Bedeutung für die klinische Erforschung digitaler Zwillinge. [10]

Die Entwicklung digitaler Menschmodelle als sozio-kognitives-System wird durch die Integration von Vitalparametern und multimodalen Personendaten in datengetriebene oder physikalisch motivierte Modelle zur Simulation unterschiedlicher Einsatz- und Arbeitsszenarien ermöglicht. Für die Implementierung in sozio-cyberphysischen Produktionssystemen ist darüber hinaus die Berücksichtigung organisatorischer Parameter, wie Qualifikationsmatrizen sowie Schicht- und Urlaubspläne, erforderlich, um zusätzliche Abhängigkeiten abzubilden und mittels geeigneter Modellarchitekturen analysieren zu können. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf Mensch-Maschine oder Mensch-Produktionssystem-Simulationen, wobei Aspekte der Arbeitssicherheit, Ergonomie und Leistungsfähigkeit eine zentrale Rolle einnehmen.

Im Kontext der Mensch-Maschine-Kollaboration sind zudem vielfältige menschliche Faktoren zu berücksichtigen, darunter kognitive Arbeitsbelastung, Benutzerfreundlichkeit, Vertrauen, Akzeptanz, Stress, Frustration, Informationsüberfluss sowie Motivation [11]. Eine unzureichende Berücksichtigung dieser Faktoren kann zu Überforderung oder Ablehnung führen, weshalb sie integraler Bestandteil der Systemgestaltung sein müssen [12]. Darüber hinaus sind bei menschenzentrierten Ansätzen die körperlichen, sensorischen und kognitiven Fähigkeiten des Menschen zu berücksichtigen, die sowohl physische Funktionen als auch Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse umfassen [13].

Eine ergonomisch optimierte Gestaltung von Produktionsmitteln und Arbeitsplätzen ist hierbei von entscheidender Bedeutung, um körperliche Belastungen zu reduzieren und die Produktivität zu steigern. Eine unzureichende Gestaltung der Arbeitsplätze kann zu einer Steigerung des Stresspegels und einer Reduktion der Leistungsfähigkeit führen [14]. Insbesondere in Produktionsumgebungen sollten Belastungen durch langanhaltende Zwangshaltungen, hohe Kraftaufwände, repetitive Bewegungsabläufe sowie ungünstige Greifformen vermieden und Arbeitsplatz-Elemente gezielt optimiert werden [15]. Die daraus resultierenden Kerndaten können wiederum als Indikator, wie auch als Abgleich- und Referenzpunkte für Validierungsaufgaben des Ist-Soll-Zustandes im virtuellen System darstellen.

3 Umsetzung der virtuellen Systemumgebung

Digitale Zwillinge sind ein zentrales Element cyberphysischer Produktionssysteme, in denen physische Produktionsmittel und -prozesse mit virtuellen Modellen, analytischen Diensten und Optimierungsverfahren gekoppelt werden. Abhängig vom Anwendungsfall reichen digitale Zwillinge von offline genutzten Simulationsmodellen für Varianten- und „What-if“-Analysen bis hin zu laufzeitnahen Systemen mit kontinuierlichem Datenabgleich. In der virtuellen Repräsentation werden rele-

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

vante Zustände, Stellgrößen und Qualitätskennzahlen erfasst, um fundierte Entscheidungen in Planung und Betrieb zu unterstützen [16], [17].

Während digitale Zwillinge seit mehreren Jahrzehnten in der Produktionsplanung und -steuerung etabliert sind [18], ist die explizite Integration ergonomischer und menschzentrierter Modelle bislang nur begrenzt verbreitet. Aktuelle Forschungsarbeiten fokussieren sich überwiegend auf konzeptionelle oder prototypische Ansätze, in denen digitale Menschmodelle, Bewegungsdaten und ergonomische Bewertungsverfahren mit Prozess- und Layoutsimulationen kombiniert werden. Ziel ist es, ergonomische Risiken wie ungünstige Körperhaltungen, hohe biomechanische Belastungen oder eingeschränkte Greifräume bereits in frühen Planungsphasen systematisch zu identifizieren. [19]

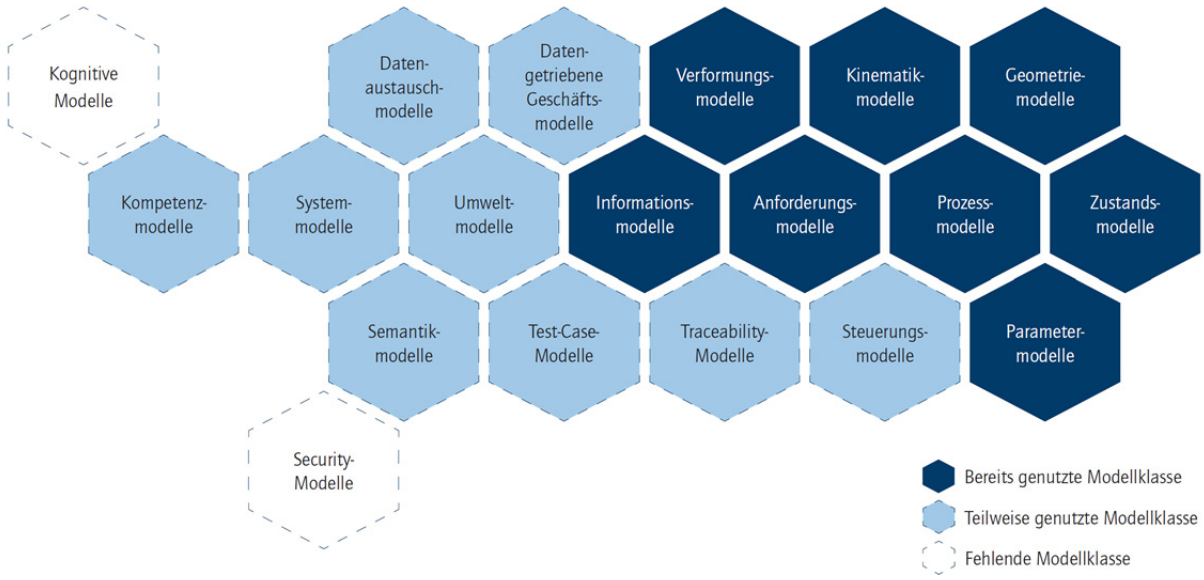

Abbildung 2: Übersicht über die genutzten, teilweise genutzten und nicht genutzten Modellklassen als übergeordnete Darstellung und Einordnung der Modelltypen (nach [16])

Die Simulation menschlichen Verhaltens stellt eine wesentliche Herausforderung dar, da dieses als variabel und adaptiv beschrieben werden kann. Die Bewegungsstrategien des Menschen unterliegen einer Anpassung an die Gegebenheiten der Umgebung, der zugewiesenen Aufgabe sowie der individuellen Voraussetzungen. Es bestehen Einflussfaktoren wie Ermüdung, Erfahrung und anthropometrische Vielfalt. Dies stellt eine Herausforderung dar, sofern die Systeme eine Laufzeitnähe aufweisen und ein kontinuierlicher Datenabgleich erforderlich ist. In diesem Kontext werden die kognitiven Modelle gemäß Abbildung 2 herangezogen, die sich derzeit noch in der Forschungsphase befinden [16]. Aus diesem Grund basieren zahlreiche Ansätze auf vereinfachten, parametrierten Bewegungsmodellen, die durch empirische Daten ergänzt werden. Sensorbasierte Erfassungssysteme, zu denen unter anderem Wearables, Motion-Capture- und bildbasierte Verfahren zählen, erfassen Bewegungs- und Haltungsdaten. Diese Daten werden zur Kalibrierung und Validierung digitaler Menschmodelle herangezogen [20].

Menschenzentrierte digitale Technologien sind ein entscheidender Faktor für den Aufbau und die Gestaltung von Produktionssystemen, die durch die folgenden Eigenschaften gekennzeichnet sind: Empathie, Transparenz und ethische Nachhaltigkeit. Diese Systeme ermöglichen eine sinnvolle Zusammenarbeit zwischen Menschen und KI. Dies ist ein wesentlicher Aspekt der Weiterentwicklung von Industrie 5.0. [21]

Die konzeptionelle Struktur eines digitalen Zwillings inkl. der Einbettung von digitalen Menschmodellen für Mensch-Maschine-Interaktionen kann in drei Komponenten unterteilt werden: die physische Entität, die virtuelle Entität und die Verbindungsinfrastruktur (Abbildung 3).

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

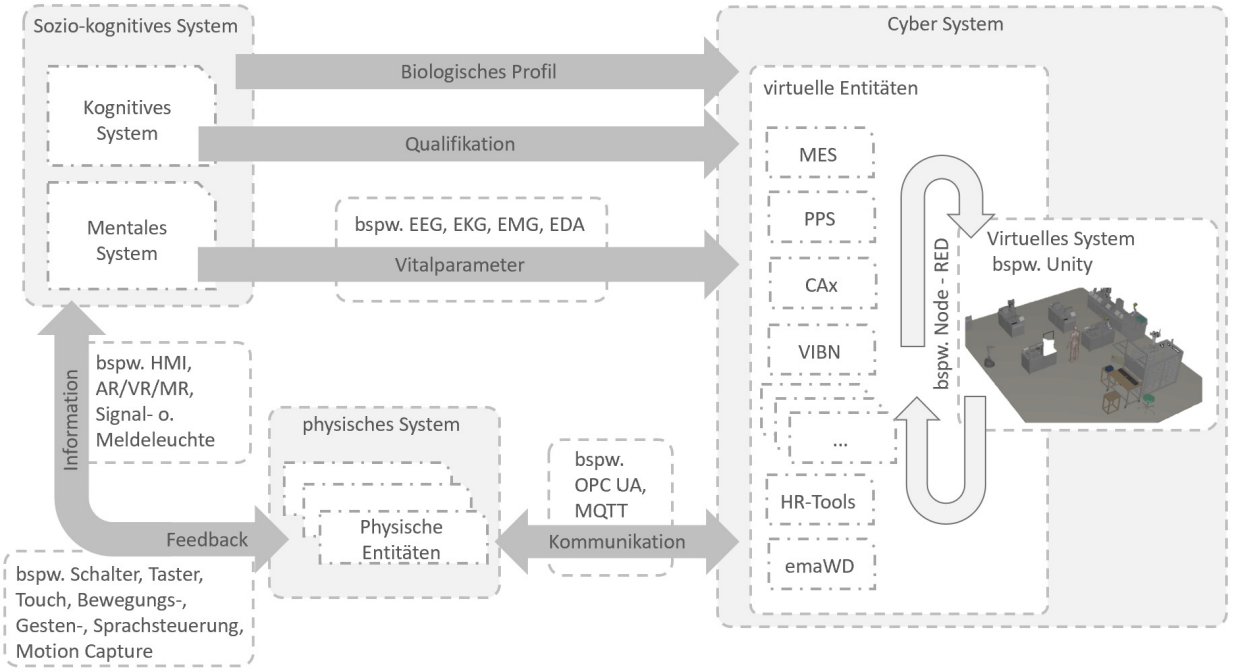

Abbildung 3: Topologische Sicht auf die Integration eines Digitalen Zwillings und der Einbindung der physischen und virtuellen Entitäten sowie der Verbindungsinfrastruktur für die Integration von digitalen Menschmodellen am Beispiel eines sozio-cyberphysichen Produktionssystem

Die Realisierung eines digitalen Ergonomie-Zwillings bedingt konsistente Datenflüsse aus diversen Quellen. In der Regel erfolgt die Übernahme geometrischer Informationen aus CAD-Systemen und deren Integration in die Simulations- oder Visualisierungsumgebung. Prozessdaten, wie beispielsweise Arbeitspläne, Taktzeiten und Ressourcenzuordnungen, stellen eine wesentliche Ergänzung dieser Basis dar, da sie zeitliche und logische Abläufe umfassen. Im Rahmen des Betriebs werden durch Sensoren Positions-, Geschwindigkeits- und Zustandsdaten erfasst und sowohl für das Monitoring als auch für iterative Verbesserungsprozesse genutzt. [16]

Auf algorithmischer Ebene erfolgt die Kombination mehrerer Simulationsebenen. Der Einsatz von ereignisorientierten Simulationen ermöglicht die Analyse von Durchsatz, Auslastung und Wartezeiten. Demgegenüber stellen physikbasierte Simulationen die Abbildung von Kollisionen, Dynamikgrenzen und Kontaktkräften sicher. Wie in Abbildung 1 dargestellt basieren die Ergebnisse auf den erfassten System- und Prozessdaten. Die ergonomische Bewertung erfolgt durch die Ableitung standardisierter Kennzahlen aus simulierten Körperhaltungen und Belastungen. Diese Kennzahlen können beispielsweise mittels MTM ermittelt, über EAWS (Ergonomic Assessment Work Sheet) bestimmt oder auch gemäß der VDI 4499, Blatt 4 [22] beschrieben werden. In Ergänzung dazu werden Optimierungsverfahren eingesetzt, welche Layoutvarianten, Bewegungsstrategien oder Aufgabenzuordnungen systematisch variieren, um Zielgrößen wie die ergonomische Qualität und die Produktivität zu verbessern [23]. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Daten können KI-gestützte Verfahren eingesetzt werden, um Muster in menschlichen Bewegungen zu erkennen und alternative Szenarien zu generieren oder zu bewerten. Die Verarbeitung von Sensordaten muss mit einem hohen Maß an Robustheit, in Echtzeit und unter Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Vorschriften erfolgen, um eine verlässliche Abbildung menschlicher Zustände zu gewährleisten.

Die praktische Realisierung erfolgt in der Regel in interaktiven 3D-Umgebungen auf Basis von Game-Engines wie Unity oder Metaverse. Im Rahmen des vorliegenden Prozesses erfolgt die Konvertierung von CAD-basierten Modellen von Arbeitsumgebungen und Ressourcen in engine-kompatible Formate. Zudem werden diese mit semantischen Informationen angereichert. Digitale Menschmodelle, die über eine definierte Skelettstruktur und Gelenkgrenzen verfügen, erlauben die Animation von Be-

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

wegungen sowie die Ableitung ergonomischer Kennzahlen wie es bspw. die ema Work Designer (emaWD) -Softwarelösung anbietet (vgl. Abbildung 4 links) [24]. Die Game-Engine nimmt die Funktion des Frontends des digitalen Zwillings ein. In dieser können externe Simulations- und Analysekomponenten über Schnittstellen eingebunden und mit der realen Welt verbunden werden.

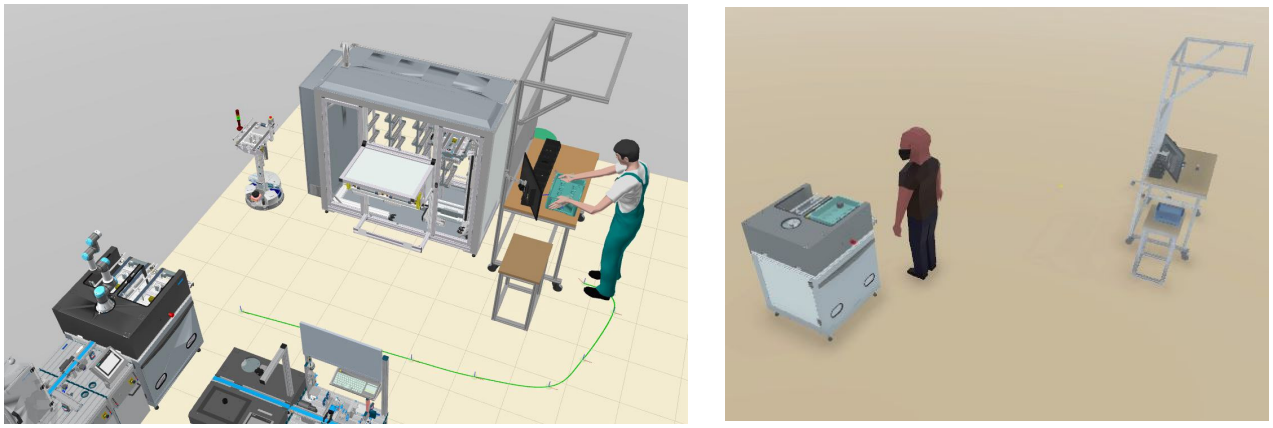

Abbildung 4: links: Darstellung des Laufweges in emaWD zur Ergonomie- und Belastungsberechnung, die Person befindet sich gerade in der Phase 4 von der Abbildung 8; rechts: vereinfachte Aufbereitung des Prozessablaufes in Unity in der Phase 11 von der Abbildung 8

4 Integration von Vitalparametern

Digitale Menschmodelle sind in der Lage, Vitalparameter als kontinuierliche, personalisierte Eingangsgrößen zu nutzen, um ein dynamisches biophysikalisches oder datengetriebenes Modell des Individuums zu kalibrieren und in Echtzeit zu aktualisieren. [10] Im vorliegenden Fall der Arbeit wurden EMG-Daten herangezogen, die als spezieller Digital-Biomarker für neuromuskuläre Aktivität dienen. Die Oberflächen-Elektromyografie (EMG) ist ein Verfahren zur Messung der elektrischen Aktivität von Muskeln. Sie basiert auf den myoelektrischen Signalen, die durch die neuronale Ansteuerung der Muskelfasern entstehen. In Bezug auf die bewegungstechnische Arbeitsgestaltung ergänzt die Elektromyografie (EMG) Systeme mit vorbestimmten Zeiten, wie beispielsweise Methods Time Measurement (MTM) oder Work Factor (WF). Diese Systeme fokussieren sich ausschließlich auf die Dimension "Zeit" bzw. den Zeitbedarf für elementare Bewegungen, die Elektromyografie ergänzt diese um Informationen bezüglich der muskulären Beanspruchung und Belastung gerade auch im Bereich repetitiver Belastungen oder deren Ermüdungen [25].

Zur Erfassung von EMG-Werten sollten hohe Abtastraten (2.000 bis 4.000 Hz) verwendet werden [25] womit dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem Rechnung getragen wird, wobei die höchste zu erwartende Frequenz doppelt so hoch aufgezeichnet werden sollte [26]. Neben der RMS-Berechnung, können der Amplitudenvergleiche, zeitliche Analysen der Aktivität im Bewegungsablauf sowie Seitenvergleiche herangezogen werden. Die RMS-Berechnung bezeichnet die Glättung des EMG-Signals zu einem vergleichbaren Aktivitäts-/Effektivwert, der als "root mean square" bezeichnet wird. Der Amplitudenvergleich stellt den Vergleich der maximalen Muskelspannung dar. Zeitliche Analysen der Aktivität im Bewegungsablauf zeigen Aktivitätsveränderungen über die Zeit auf, wohingegen die Seitenvergleiche die Unterschiede zwischen rechter und linker Körperhälfte aufzeigen.

Mittels dieser ist es möglich, den Zwilling anzusteuern und zu referenzieren. In Abhängigkeit des gewählten Modellansatzes besteht die Möglichkeit, Funktionen wie Muskelkraft, Ermüdung oder Bewegungsqualität zu erfassen und zu evaluieren. Zur Durchführung einer robuste Datenauswertung und Integration [9] wurden vier EMG-Systeme eingesetzt, um die Biosignal-Marker robust zu bestimmen. Die Elektroden der EMG-Systeme werden entsprechend der Darstellung in Abbildung 5

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

(4) am Ober- und Unterarm positioniert. Zur Erfassung der Signale wurde ein OpenBCI Cyton in Kombination mit vier MyoWare 2 Muscle Sensor verwendet. Dieser arbeitet mit 250 Hz ist jedoch für den Einsatzzweck ausreichend. [27], [28] Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung kamen Einmal-EKG-Elektroden des Typs EKG-Dahlhausen 405 mit einem Durchmesser von 45 mm und einer leitfähigen Kontaktfläche von 2 cm² als Oberflächenelektroden zum Einsatz. Zur Optimierung der Leitfähigkeit der Kontaktfläche zwischen Haut und Elektrode wurde zudem ein ECI Elektrodengel aufgetragen.

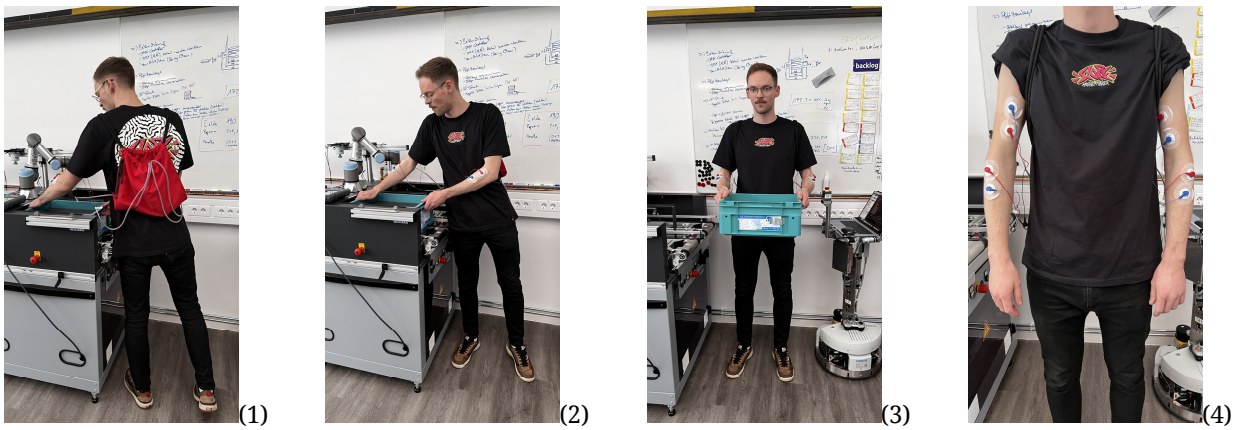

Abbildung 5: Studienaufbau zur Aufzeichnung von Messdaten mittels EMG. Von links nach rechts: (1) Entnahme der Kiste von links mit einer höheren Belastung auf dem rechten Arm. (2) Entnahme der Kiste von rechts mit einer höheren Belastung auf dem linken Arm. (3) Halteposition zur Evaluierung der allgemeinen Muskelaktivitäten. (4) Positionierung der vier EMG-Sensoren an den Ober- und Unterarmen

5 Studienplanung und Ergebnisse

Zur Bestimmung der Biosignal-Marker wurde jeweils eine Messreihe mit 30 Aufnahmen durchgeführt, wie in Abbildung 6: dargestellt. Dabei wurden jeweils Aufnahmen des Handlings- und Aufnahmeprozesses von einer Kiste von links und rechts angefertigt. Die Dimensionen der zu hebenden Kiste sind 300 mm × 400 mm, während das Gewicht der Kiste 2 kg beträgt. Es wurde darauf geachtet, dass jede Messreihe mit einer Initialisierungsphase begann, in welcher sich der Proband in ruhiger stehender Position neben der Kiste befand. Der Start der Messaufzeichnung sowie der Beginn der ersten Messphase zur Bestimmung des RMS erfolgt zeitgleich mit einem akustischen Signal. Die Messung wird in einer entspannten Position begonnen. Mit dem zweiten akustischen Signal wird der Proband instruiert, die Kiste gemäß den ersten beiden Bildern aufzunehmen und sie anschließend, wie in Abbildung 5 (3) dargestellt, zu halten. In der vierten Phase, wie in Abbildung 6 dargestellt, erfolgt die Messung der RMS im gleichmäßig angespannten Zustand.

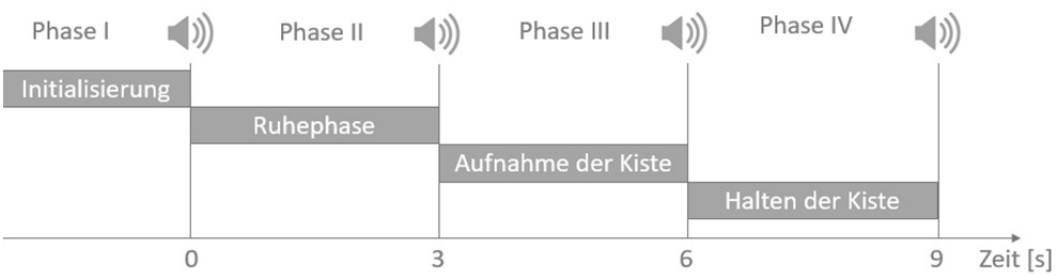

Abbildung 6: Darstellung des Messablauf zur Ermittlung der RMS-Werte

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

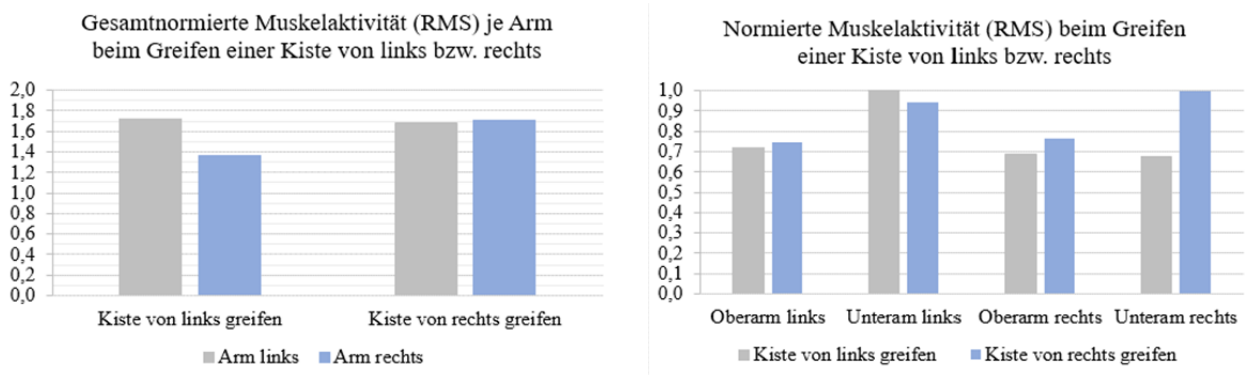

Abbildung 7: Normierte RMS-Werte beim Greifen einer Kiste von links bzw. rechts

Abbildung 7 zeigt die normierten RMS-Werte der Muskelaktivität beim Greifen einer Kiste von links und von rechts. Bei einer Gesamtnormierung des vollständigen linken und rechten Arms ist im linken Diagramm zu erkennen, dass beim Aufnehmen der Kiste von rechts eine vergleichbare Muskelaktivität in beiden Armen vorliegt. Dieses Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass die zugrunde liegenden Messreihen an rechtshändigen Probanden durchgeführt wurden.

Durch diesen Vergleich lässt sich im digitalen Menschmodell überprüfen, ob die Kiste von der linken oder der rechten Seite aus aufgenommen wird. Die Aufnahme von links erfordert eine höhere Muskelaktivität im linken Arm. Diese Diskrepanz zeigt sich jedoch erst bei einer simultanen Betrachtung von Ober- und Unterarm. Eine separate Analyse von Ober- und Unterarm ergibt keine signifikanten Unterschiede in der Muskelaktivität (vgl. Abbildung 7 (rechts)). Diese Erkenntnis manifestiert sich in der Phase 8 und 10 der Abbildung 8. In der achten Phase ist eine gleichmäßige Amplitude beider Arme bei der Vorpositionierung und Abstellung der Kiste in die Aufnahmepositionierung zu vermerken. In der neunten Phase erfolgt eine Entspannung der Arme durch ein leichtes Umgreifen. Der Ablageprozess findet seinen Abschluss in der zehnten Phase, in welcher der linke Arm ausgestreckt ist und der rechte Arm die Kiste bis zum Anschlag nachpositioniert. In dieser Phase wird keine volle Anspannung mehr benötigt, wie in Abbildung 5 (1) ersichtlich.

Die Abbildung 8 veranschaulicht die Muskelaktivität während eines Transportprozesses. Sowohl bei der Aufnahme als auch beim Absetzen der Kiste sind zwei signifikante Aktivitätspeaks erkennbar. Die Signalstärke ist dabei um den Faktor vier geringer als während der gleichmäßigen beidarmigen Muskelanspannung im Transportvorgang. Das im Signal vorhandene Rauschen ist auf den kontinuierlichen, überwiegend unbewussten Balanceausgleich der Last durch die Arme sowie auf die entstehenden Bewegungsartefakte zurückzuführen. Die Signalstärke sowie deren zeitliche Korrelation in Verbindung mit dem vorhergehenden Signalverlauf ermöglichen im digitalen Menschmodell die Deduktion der aktuell ausgeführten Tätigkeit.

6 Diskussion und Ausblick

Im Kontext moderner Simulationsumgebungen gewinnen digitale Zwillinge und digitale Menschmodelle, insbesondere zur Analyse ergonomischer Fragestellungen und physischer Belastungsanforderungen an Arbeitsplätzen, zunehmend an Bedeutung. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Mehrzahl der existierenden Modellansätze sich auf rein simulative und kinematische Betrachtungen beschränkt. Dies führt dazu, dass kognitive und physiologische Aspekte menschlichen Handelns bislang nur unzureichend abgebildet werden. In Anbetracht der menschenzentrierten Zielsetzung der Industrie 5.0 wird deutlich, dass diese klassischen Ansätze einer Erweiterung bedürfen, um den Menschen nicht lediglich als biomechanisches, sondern als sozio-kognitives System zu modellieren.

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

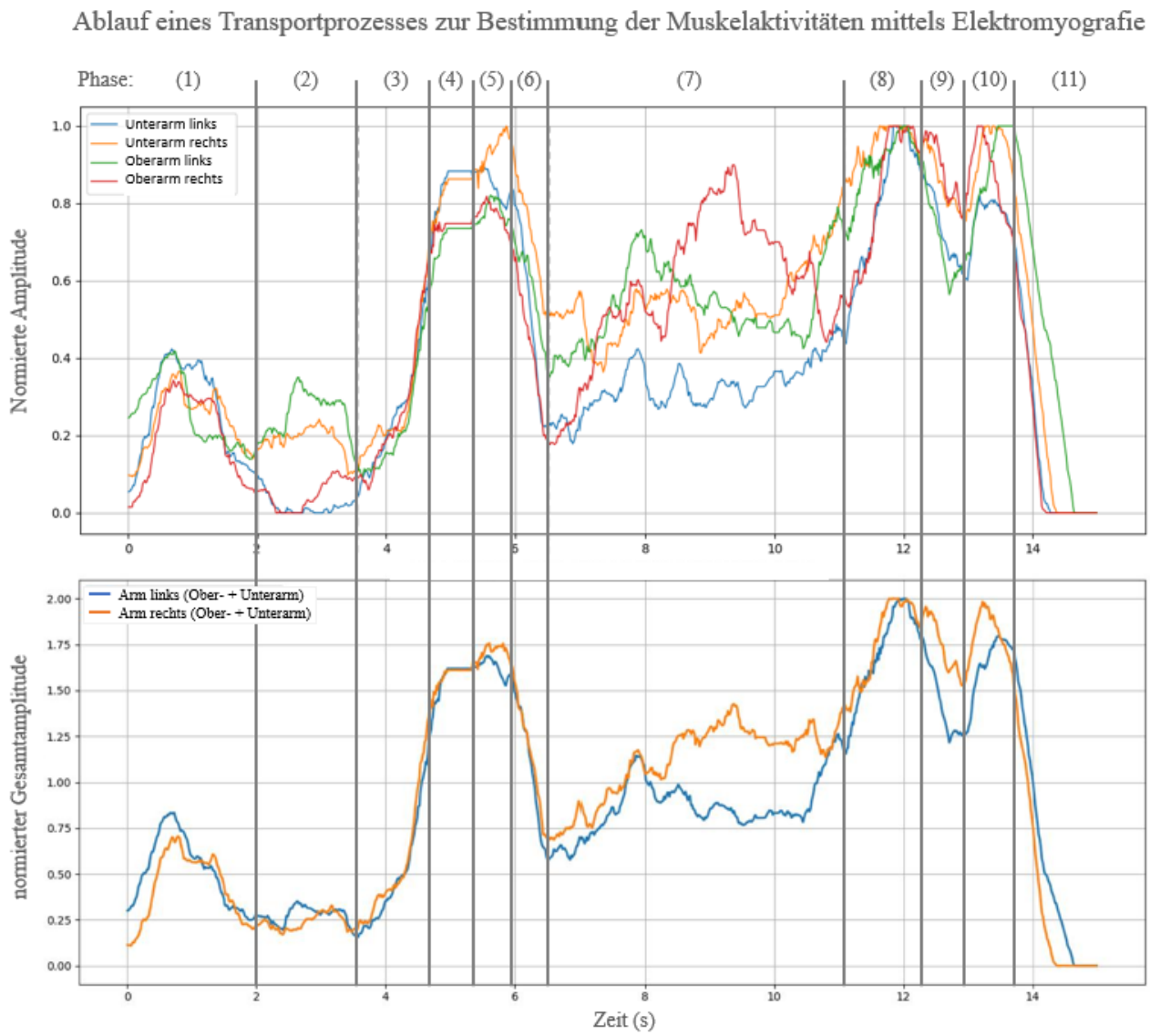

Abbildung 8: Exemplarische Aufzeichnung der normierten Amplituden eines Transportprozesses von der Aufnahme einer Kiste, dessen Transport und Ablage der Kiste am Zielort durch einen Rechtshänder-Probanden. Der obere Bereich zeigt die vier einzelnen EMG Amplituden auf. Der untere Bereich zeigt die zusammengefasste normierte Amplitude vom jeweiligen Ober- und Unterarm. Entsprechend des Prozesses gliedert sich der Ablauf in die folgenden Phasen auf: (1) Initialisierungsphase, (2) Ruhrphase, Bewegung der Hände zur Kiste, (4) Positionierung der Hände über die Griffmulden, (5) Aufnahme der Kiste, (6) Positionierung der Kiste vor den Körper, (7) Transport der Kiste zur Ablagestation, (8) Einfädeln der Kiste in Ablagestation, (9) nachgreifen der Kiste, (10) Nachpositionierung der Kiste bis zur Endposition, (11) Entspannung der Arme.

Daher wurde der Einsatz digitaler Biosignalmarker, insbesondere der Oberflächen-Elektromyografie (EMG), als Erweiterung bestehender digitaler Menschmodelle untersucht. Anhand eines exemplarischen Transportprozesses konnte aufgezeigt werden, dass die Deduktion aktueller menschlicher Handlungen und Belastungszustände für den virtuellen Raum prinzipiell möglich ist. Die Implementierung innerhalb einer Unity-basierten Umgebung verdeutlichte, dass physiologische Echtzeitdaten als zusätzliche Informationsquelle genutzt werden können, um menschliches Verhalten kontextsensitiv abzubilden und diese innerhalb der Unity-Umgebung mit externen Simulationsdaten bspw. aus emaWD in Abhängigkeit gegenüberstellen zu können. Insbesondere zeigte sich, dass die Dominanz der Körperseite einen signifikanten Einfluss auf das Modellverhalten und die Interpretation der Biosignale ausübt. Ohne eine explizite Berücksichtigung dieser individuellen Unterschiede kann die Aussagekraft der Modelle eingeschränkt sein. Darüber hinaus wurde deutlich, dass einzelne Vitalpa-

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

rameter für sich genommen keine hinreichend robusten Aussagen über den aktuellen Belastungsstand des Menschen und dessen aktuelle Tätigkeit zulassen. Erst eine multidimensionale Betrachtung, die mehrere physiologische und gegebenenfalls kinematische Parameter kombiniert, ermöglicht eine belastbare Bewertung von Beanspruchung und Ermüdung.

Im Vergleich zu klassischen Motion-Capture-Ansätzen, die häufig zur Kalibrierung und Validierung digitaler Menschmodelle eingesetzt werden, ist der hier verfolgte Ansatz auf Basis von Vitalparametern methodisch aufwendiger. Er bietet jedoch einen entscheidenden Mehrwert, da nicht nur Bewegungsabläufe, sondern auch Belastungsansprüche und Ermüdungsverhalten bei repetitiven Tätigkeiten erfasst werden können. Insbesondere im Hinblick auf Echtzeitabgleiche und adaptive Systeme zur Entwicklung sozio-cyberphysischer Produktionssysteme stellt dieser Ansatz eine vielversprechende Ergänzung bestehender Simulationsmethoden dar.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen das Potenzial, aber auch den weiteren Forschungsbedarf beim Einsatz von Vitalparametern zur Erweiterung digitaler Menschmodelle. Zukünftige Arbeiten sollten darauf abzielen, zusätzliche physiologische und verhaltensbezogene Parameter systematisch zu integrieren, um die Abbildung des Menschen als sozio-kognitives System weiter zu vervollständigen. Neben klassischen Handhabungsprozessen sind insbesondere Ansätze zur Bewegungsüberwachung, zur Analyse des Lauf- und Wegeverhaltens sowie zur Erfassung situativer Interaktionen von Interesse. Ein zentraler Forschungsschwerpunkt liegt dabei in der Entwicklung geeigneter Datensätze und Fusionsmethoden, die eine konsistente Übertragung des menschlichen Verhaltens aus dem realen in den virtuellen Raum ermöglichen. Zu den entsprechenden Ansätzen zählen sowohl sensorische Erweiterungen als auch modellbasierte Verfahren, die kognitive Entscheidungsprozesse berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Validierung der Modelle unter realen Produktionsbedingungen erforderlich, um deren Praxistauglichkeit und Skalierbarkeit sicherzustellen. Die Kombination aus digitalen Zwillingen, Vitalparametern und kognitiven Modellen eröffnet langfristig neue Perspektiven für adaptive, menschenzentrierte bzw. sozio-cyberphysische Produktionssysteme. In Anbetracht der Herausforderungen, die sich aus der Industrie 4.0 als auch aus der Industrie 5.0 ergeben, könnten derartige kognitive Modelle einen wichtigen Beitrag zur Optimierung von Arbeitsprozessen leisten. Ein wesentlicher Aspekt dieser Optimierung besteht in der Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit sowie in der gesundheitsgerechten Gestaltung zukünftiger Arbeitsprozesse unter Berücksichtigung des mentalen und kognitiven Systems der einzelnen Individuen.

7 Literaturverzeichnis

[1] G. Lazaroiu, T. Gedeon, K. Valášková und M. Nagy, „Cognitive digital twin-based Internet of Robotic Things,multi-sensory extended reality and simulation modeling technologies, and generative artificial intelligence and cyber–physical manufacturing systems in the immersive industrial metaverse,“ *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy,* Bd. Vol. 19, Nr. 3, pp. 719-748, 2024.

[2] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, M. Fathi, A. Rejeb, B. Foroughi und D. Nikbin, „Beyond Industry 4.0: A systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability,“ *Asia-Pacific Journal of Business Administration,* 2024.

[3] M. Söllner, A. Hoffmann, H. Hoffmann und J. M. Leimeister, „Vertrauensunterstützung für sozio-technische ubiquitäre Systeme,“ *Zeitschrift für Betriebswirtschaft,* Bd. 82, Nr. ZfB-Special Issue 4/2012, p. 109–140, 2012.

[4] D. Yin, X.Ming und X. Hang, „Understanding Data-Driven Cyber-Physical-Social System (D-CPSS) Using a 7C Framework in Social Manufacturing Context,“ *Sensors,* Bd. 20, p. 5319, 2020.

[5] N. Günther, J. Reiff-Stephan und U. Berger, „Industrie 5.0 -Integration des Menschen als sozio-kognitives System in sozio-cyberphysischen Produktionssystemen (SCPPS),“ in *EKA 2022*, Magdeburg, 2022.

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

[6] H. Guo, Y. Zhu, Y. Zhang, Y. Ren, M. Chen und R. Zhang, „A digital twin-based layout optimization method for discrete manufacturing workshop," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Nr. 112, p. 1307–1318, 2021.

[7] G. Coorey, G. A. Figtree, D. F. Fletcher, V. J. Snelson, S. T. Vernon, D. Winlaw, S. M. Grieve, A. McEwan, J. Y. H. Yang, P. Qian, K. O'Brien, J. Orchard, J. Kim, S. Patel und J. Redfern, „The health digital twin to tackle cardiovascular disease a review of an emerging interdisciplinary field," *npj Digital Medicine,* Nr. 5:126, 2022.

[8] M. Soori, B. Arezoo und R. Dastres, „Digital twin for smart manufacturing, A review," *Sustainable Manufacturing and Service Economics,* Bd. 2, Nr. 100017, 2023.

[9] E. VanDerHorn und S. Mahadevan, „Digital Twin: Generalization, characterization and implementation," *Decision Support Systems,* 2021.

[10] C. Niklas, T. Hölle, M. Dugas, M. A.Weigand und J. Larmann, „Der digitale Zwilling für die perioperative Medizin – ein spannender Blick in die Zukunft klinischer Forschung," *Anaesthesiologie,* Nr. 72, p. 191–194, 2023.

[11] L. Gualtieri, F. Fraboni, M. d. Marchi und E. Rauch, „Development and evaluation of design guidelines for cognitive ergonomics in human-robot collaborative assembly systems," *Applied ergonomics,* Nr. 104.

[12] V. d. Simone, V. Di Pasquale, V. Giubileo und S. Miranda, „Human-Robot Collaboration: an analysis of worker's performance," *Procedia Computer Science,* Nr. 200, p. 1540–1549, 2022.

[13] A. A. Malik und A. Bilberg, „Human centered Lean automation in assembly," *Procedia CIRP,* Nr. 81, p. 659–664, 2019.

[14] A. A. Malik und A. Brem, „Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* Nr. 68.

[15] L. Gualtieri, E. Rauch, R. Vidoni und D. T. Matt, „Safety, Ergo-nomics and Efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: Design Guide-lines and Requirements," *Procedia CIRP,* Nr. 91, p. 367–372, 2020.

[16] M. Manoury, J. Brünnhäußer, A. Geiger und K. Lindow, Modellierungs- und Simulationsbedarfe der intelligenten Fabrik, München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2021.

[17] K. Florian, E. Peter, F. Förster und G. Händel, Der Digitale Zwilling im industriellen Kontext- Eine regionale Perspektive, TTZ Flexible Automation, 2022.

[18] F. Tao, Q. Qi, L. Wang und A. Nee, „Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison," *Engineering,* Nr. 5, p. 653–661, 2019.

[19] M. Spitzhirn, S. Ullmann, S. Bauer und L. Fritzsche, „Digital production planning and human simulation of manual and hybrid work processes using the ema Software Suite," in *7th International Digital Human Modeling Symposium*, 2022.

[20] T. Maruyama, T. Ueshiba, M. Tada, H. Toda, Y. Endo, Y. Domae, Y. Nakabo, T. Mori und K. Suita, „Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human," *Sensors,* Nr. 21, p. 8266, 2021.

[21] T. B. Woldesemayat und B. Getahun, „Human-Centric Digital Twins: Ethical and Transparent Applications," *International Journal of Emerging Multidisciplinary Research And Innovation (IJEMRI),* 2025.

[22] V.-G. P. u. Logistik, VDI 4499/ Blatt 4 - Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der digitalen Fabrik, Berlin: VDI 4499/ Blatt 4 , 2015.

[23] A. Ünlü, M. Spitzhirn, O. Ak und K. Kluth, „Kombinierte Analyse von Mess- und Simulationswerkzeugen zur ergonomischen Bewertung von Produkten und Arbeitsprozessen," in *Frühjahrskongress 2025 - Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit*, Aachen, GfA, Sankt Augustin , 2025.

[24] M. Spitzhirn, C. Gärtner und L. Fritzsche, „Digital planning of ability-appropriate and productive human-robot interactions in production," *IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO),* pp. 166-171, 2023.

[25] B. Steinhilber, M. Jäger, N.-P. Schumann, T. Luger, C. A. I. Bradl, R.-D. Treede, K. Kluth und R. Seibt, „Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft S2k-Leitlinie," Nr. VERSION 4.0 / 20.11.2022, 2022.

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

[26] U. Karrenberg, Das unzertrennliche Duo: Digitale Signalverarbeitung und Künstliche Intelligenz - Wie Künstliche Intelligenz und Digitale Signalverarbeitung moderne intelligente Systeme antreiben, Berlin: Springer Nature , 2025.

[27] J. C. Ives und J. K. Wigglesworth, „Sampling rate effects on surface EMG timing and amplitude measures,“ *Clinical Biomechanics* , Nr. 18, p. 543–552, 2003.

[28] G. Van Boxtel, L. Geraats, M. Van Den Berg-Lenssen und C. Brunia, „Detection of EMG onset in ERP research,“ *Psychophysiology* , Nr. 30, p. 405–412, 1993.

Open Access. © 2026 N. Günther, T. Federsel, J. Reiff-Stephan
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +