

Vogel-Heuser, Birgit; Bengler, Klaus

Article — Published Version

Von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0 – Idee, Konzept und Wahrnehmung

HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik

Suggested Citation: Vogel-Heuser, Birgit; Bengler, Klaus (2023) : Von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0 – Idee, Konzept und Wahrnehmung, HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, ISSN 2198-2775, Springer Fachmedien Wiesbaden, Vol. 60, Iss. 6, pp. 1124-1142, <https://doi.org/10.1365/s40702-023-01002-x>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/313667>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0 – Idee, Konzept und Wahrnehmung

Birgit Vogel-Heuser · Klaus Bengler

Eingegangen: 2. Juni 2023 / Angenommen: 1. August 2023 / Online publiziert: 24. August 2023
© The Author(s) 2023

Zusammenfassung In der sich rasant entwickelnden Landschaft der industriellen Automatisierung läutet das Aufkommen von Industrie 5.0 (I5.0) einen Paradigmenwechsel hin zu einem stärker kollaborativen und menschenzentrierten Ansatz ein. In diesem Beitrag wird die Rolle der Mensch-Maschine-Kollaboration und menschenzentrierter Werkzeuge bei der Förderung einer symbiotischen Beziehung zwischen fortschrittlichen Technologien und menschlichen Benutzern untersucht, um so das volle Potenzial von I5.0 zu erschließen. Als nächste Stufe in der Entwicklung des Produktionssektors zielt I5.0 darauf ab, ein Gleichgewicht zwischen Automatisierung und menschlichen Fähigkeiten herzustellen und die sich ergänzenden Stärken beider zu nutzen. Es werden Technologien vorgestellt, welche menschenzentrierte Lösungen zur Steigerung von Produktivität, Flexibilität und Nachhaltigkeit in der Fabrik der Zukunft fokussieren.

Schlüsselwörter Industrie 5.0 · Industrie 4.0 · Mensch-Maschine-Kollaboration · Menschenzentrierte Automatisierung · Cyber-physische Produktionssysteme · Fabrik der Zukunft

✉ Birgit Vogel-Heuser

Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme, TUM School of Engineering and Design,
Work @ Munich Institute of Robotics and Machine Intelligence, TU München, 85748 Garching,
Deutschland
E-Mail: vogel-heuser@tum.de

Klaus Bengler

Lehrstuhl für Ergonomie, TUM School of Engineering and Design, Work @ Munich Institute of
Robotics and Machine Intelligence, TU München, 85748 Garching, Deutschland

From Industry 4.0 to Industry 5.0—Idea, Conception, and Perception

Abstract In the rapidly evolving landscape of industrial automation, the emergence of Industry 5.0 (I5.0) signals a paradigm shift towards a more collaborative and human-centered approach. This paper examines the role of human-machine collaboration and human-centered tools in fostering a symbiotic relationship between advanced technologies and human users to unlock the full potential of I5.0. As the next stage in the evolution of the manufacturing sector, I5.0 aims to establish a balance between automation and human capabilities, leveraging the complementary strengths of both. It introduces technologies that focus on human-centered solutions to enhance productivity, flexibility, and sustainability in the factory of the future.

Keywords Industry 5.0 · Industry 4.0 · Human-Machine Collaboration · Human-Centered Automation · Cyber-Physical Production Systems · Factory of the Future

1 Kernmerkmale der Industrie 5.0

In der sich rasant entwickelnden Landschaft der industriellen Automatisierung läutet der Begriff Industrie 5.0 (I5.0) einen Paradigmenwechsel hin zu einem stärker kollaborativen und menschenzentrierten und ressourceneffizienten Ansatz ein (Xu et al. 2021). Während sich Industrie 4.0 (I4.0) auf die Integration digitaler Technologien in Produktionsprozessen konzentriert hat, erweitert I5.0 dessen Schwerpunkt auf den Menschen im Arbeitsprozess und die Gesellschaft, Energieeffizienz und Umweltaspekte (siehe Abb. 1).

I5.0 führt zu einem Schwerpunktwechsel von einzelnen Technologien hin zu einem systematischen Ansatz, um gesellschaftliche Ziele zu erreichen, die über Arbeitsplätze und Wachstum hinausgehen und das Wohlergehen und die Bedürfnisse der Menschen fokussieren (Xu et al. 2021).

Der Übergang zu I5.0 bringt sowohl Herausforderungen als auch Chancen mit sich. Zu den Herausforderungen gehören der Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften, die Kosten für die Umsetzung, Risiken im Bereich der Cybersicherheit und der teilweise existierende Widerstand gegen Veränderungen. Die Vorteile einer höheren Produktivität, einer stärkeren Individualisierung von Produkten und Arbeitsplätzen, einer nachhaltigen Produktion und neuer Geschäftsmöglichkeiten machen diesen Übergang für viele Unternehmen jedoch erstrebenswert. Die Grundsätze der I5.0 wurden bereits von Unternehmen und Forschungseinrichtungen realisiert. Automobilindustrie und Flugzeugindustrie setzen beispielsweise kollaborative Roboter und Augmented Reality (AR)-Technologien ein, um die Effizienz zu steigern, Fehler zu reduzieren bzw. diese auch aus der Ferne zu beheben (Reinhart 2017). In der akademischen Forschung werden die Prinzipien der I5.0 bei der Entwicklung intelligenter und flexibler Produktionsumgebungen weiterentwickelt und erprobt.

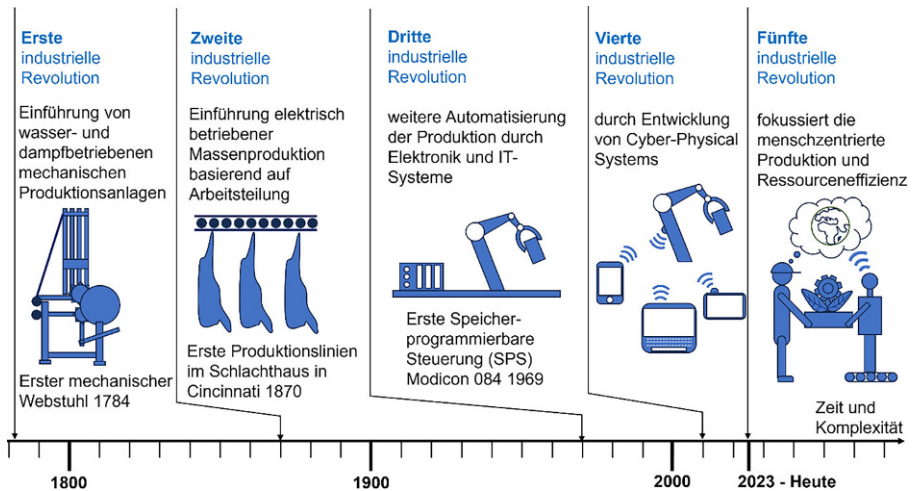


Abb. 1 Industrie 5.0 im Zeitstrahl der industriellen Entwicklung (erweitert von DFKI (2017))

2 Prinzipien von Industrie 5.0 für die intelligente Fabrik

Je nach Anforderungen können intelligente Fabriken und flexible Produktionsumgebungen in ihren Grundsätzen variieren. Die wichtigsten Gestaltungsprinzipien bauen auf den im Folgenden zusammengefassten Kriterien der I4.0 von Vogel-Heuser und Hess (2016) auf.

1. Serviceorientierte Referenzarchitektur,
2. Intelligente, selbstorganisierende Cyber-Physisches Produktionssystem (CPPS),
3. Interoperabilität zwischen CPPS und Mensch,
4. Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Anforderungen,
5. Optimierung für die Gesamteffektivität der Produktionsanlagen,
6. Datenintegration über Disziplinen und den gesamten Lebenszyklus hinweg und
7. Verlässlichkeit und Sicherheit im Sinne von Cybersicherheit.

I4.0 fördert neue soziotechnische Infrastrukturen, indem verschiedene Aspekte eines Arbeitsplatzes wie Gesundheitsmanagement und Arbeitsorganisation, lebenslanges Lernen und Karrieremodelle, Teamstrukturen und Wissensmanagement umgestaltet werden. Dies wird als soziotechnischer Ansatz der I4.0-Initiative beschrieben, der zu einem Paradigmenwechsel in den Interaktionen zwischen Mensch und Technik sowie Mensch und Umwelt führt. Die Rolle des Arbeitnehmers verändert sich durch den verstärkten Einsatz offener und virtueller Technologien erheblich. Dies spiegelt sich bereits im zweiten und dritten Gestaltungsgrundsatz der I4.0 wieder, nämlich der Informationstransparenz und technischen Unterstützung des Menschen durch den verstärkten Einsatz von Technologien wie robotergestützten Systemen, Exoskeletten, AR und weiteren Assistenzsystemen. Diese Technologien liefern den Arbeitnehmern auch die benötigten Informationen zur richtigen Zeit (in Echtzeit), um die Entscheidungsfindung und die Arbeitsabläufe zu verbessern. Im Vorfeld der Einführung von I5.0 gab es einige Diskussionen über das „Zeitalter der Augmen-

tation“, in dem Mensch und Maschine in einer Symbiose zusammenarbeiten. In ähnlicher Weise beschreiben Bednar und Welch (2020) Praktiken des „Smart Working“.

Für I5.0 werden diese Prinzipien im Kontext eines menschenzentrierten Ansatzes erweitert:

- Die Integration von Technologien wie künstliche Intelligenz (KI), Robotik und das Internet der Dinge verbessert Effizienz und Flexibilität. Das Lernen durch menschliches „Vormachen“ ist eine Methode, bei der Roboter oder andere automatisierte Systeme durch Nachahmung eines menschlichen Arbeiters erlernen, wie eine Aufgabe auszuführen ist (Karacan et al. 2022). Dieser Ansatz kann besonders nützlich sein, wenn der Fertigungsprozess ein hohes Maß an Variabilität aufweist, z. B. bei kleinen Losgrößen.
- Intelligente Fabriken und flexible Produktionsumgebungen legen den Schwerpunkt auf die Fähigkeit, kundenspezifische Produkte und kleine Losgrößen zu produzieren, die ein hohes Maß an Individualisierung ermöglichen. Es entstehen Production-as-a-Service Geschäftsmodelle, bei denen die Produktionskapazitäten einer intelligenten Fabrik als Dienstleistung angeboten werden (Balta et al. 2018; Vogel-Heuser und Hess 2016). Hersteller, die nicht über spezifisches Fachwissen oder die Ausrüstung und Ressourcen verfügen, um individuelle Kundenanforderungen zu erfüllen, können ihren Produktionsbedarf dorthin auslagern.
- Die schnelle Reaktion auf sich ändernde Marktanforderungen erfordert anpassbare und agile Produktionsprozesse. Zur Realisierung solcher Fertigungsumgebungen leisten menschliche Fähigkeiten, Kenntnisse und Kreativität im Fertigungsprozess einen erheblichen Beitrag. In einer agilen Fertigungsumgebung werden menschliche Arbeitskräfte als integraler Bestandteil des Produktionsprozesses betrachtet und ihre Fähigkeiten und Erfahrungen werden zur Verbesserung der Effizienz und Flexibilität genutzt. Was der Mensch besser kann, macht der Mensch, während der Roboter repetitive, kraftraubende Aufgaben übernimmt (Parasuraman et al. 2000). Grundsätzlich fordern Dekker und Woods (2002) bereits eine stärker menschenzentrierte Gestaltung der Robotik, die über eine zu simple Funktionsallokation hinausgeht.
- Nachhaltigkeit ist die treibende Motivation des I5.0- Paradigmas. Die Reduzierung von Abfall, Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen ist die Herausforderung des Jahrhunderts. Bei einer nachhaltigen Entwicklung ist es nicht nur wichtig, die Umweltauswirkungen von Produktionsprozessen zu minimieren, sondern auch die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen auf Arbeitnehmer, Gesellschaft und künftige Generationen zu berücksichtigen (Vogel-Heuser et al. 2020).
- Heutige Fabriken und Produktionsumgebungen sind sehr komplexe Systeme, die wiederum aus Subsystemen aufgebaut sind. Sie sind das Resultat der interdisziplinären Zusammenarbeit von Experten aus Bereichen wie Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik und Human Factors Engineering.
- Ein zentrales Prinzip der I5.0 in Deutschland ist die enge Kooperation von Wissenschaft und Industrie. Die Entwicklung innovativer Produktionstechnologien und -prozesse, die in der Praxis effektiv und effizient eingesetzt werden können, muss anhand der realen Anforderungen erfolgen und führt häufig zu neuen Forschungsfragen.

3 Die Rolle des Menschen in der Industrie 5.0

Durch die verstärkte zielgerichtete Verbindung von Mensch und Technologie, den vermehrten Einsatz von menschenzentrierten Assistenzsystemen, sowie einer veränderten Work-Life-Beziehung in industriellen Gesellschaften, verändert sich die Rolle des Menschen in der Industrie. Die menschlichen Fähigkeiten werden in den verschiedenen Phasen, von der Anforderungsanalyse über die Konstruktion, die Fertigung und die Logistik bis hin zu Service und Wartung, auch in der I5.0, weiterhin ein wichtiger Faktor sein. Der Mensch trägt auch zukünftig erheblich zu effizienten Abläufen in der Produktion bei. Der menschenzentrierte Ansatz der I5.0 verbindet den technologischen Fortschritt mit grundlegenden Bedürfnisse und Interessen der Menschen. Die Perspektive auf den Menschen ändert sich weg von einem Kostenfaktor hin zu einer Investition. Im Folgenden sind diese neuen Rollen des Menschen im industriellen Prozess dargestellt:

- **Anforderungsanalyse.** Menschliches Fachwissen ist entscheidend für die genaue Identifizierung von Kundenbedürfnissen und -erwartungen sowie für die Berücksichtigung potenzieller Einschränkungen, Risiken und gesetzlicher Anforderungen. Die menschliche Fähigkeit, komplexe Systeme zu verstehen und Erfahrungen und Präferenzen der Benutzer zu berücksichtigen, ist und bleibt unerlässlich (Frey und Osborne 2017).
- **Entwurf.** In der Entwurfsphase spielt die Kreativität, aber auch die Expertise des Menschen eine zentrale Rolle bei der Konzeption, der Erstellung von Prototypen und der Verfeinerung von Produktdesigns, wobei sowohl Funktionalität als auch Usability und Ästhetik berücksichtigt werden. Menschliche Kreativität und Problemlösungskompetenz tragen zur Entwicklung innovativer Lösungen bei, die den Anforderungen des Marktes und den Bedürfnissen der Nutzer gerecht werden (Vogel-Heuser et al. 2017b).
- **Systemintegration.** In dieser Phase spielt der Mensch eine Schlüsselrolle bei der Integration verschiedener mechatronischer Komponenten, wie mechanischen, elektrischen und Software-Subsystemen, um ein zusammenhängendes und funktionales Produkt zu erschaffen. Das interdisziplinäre Verständnis und die Kommunikationsfähigkeiten ermöglichen eine Kooperation von verschiedenen Fachdisziplinen, um alle Anforderungen zu erfüllen (Gammel et al. 2020).
- **Verifizierung und Validierung.** Menschliche Experten sind für die Prüfung und Bewertung des mechatronischen Produkts verantwortlich, um sicherzustellen, dass es die Leistungsspezifikationen, Sicherheitsstandards und Kundenanforderungen erfüllt. Sie entwerfen und führen Testpläne aus, interpretieren die Ergebnisse und geben Feedback zur kontinuierlichen Verbesserung.
- **Fertigung.** Trotz des Fortschritts in der Automatisierung sind nach wie vor Menschen erforderlich, um Fertigungsprozesse zu steuern, zu überwachen und Fehler zu beheben. Fachkräfte stellen sicher, dass die Produktion den Qualitätsstandards entspricht und reagieren auf Abweichungen oder lösen unvorhergesehen auftretende Probleme (Vogel-Heuser et al. 2017a).
- **Testen.** Die Prüfung ist eine entscheidende Phase im Lebenszyklus eines Produkts, damit das Produkt die erforderlichen Spezifikationen nachweislich erfüllt und die Sicherheitsstandards einhält (Meinecke et al. 2021).

- **Logistik.** In der Logistikphase kommt das Fachwissen von Experten besonders zum Tragen. Ihre Stärken liegen in der Fähigkeit, schnell und flexibel auf unvorhergesehene Engpässe oder Schwankungen zu reagieren. Diese Fähigkeiten sind für die Optimierung des Warenflusses und die Minimierung von Unterbrechungen in der Lieferkette essenziell (Vogel-Heuser et al. 2017c).
- **Service/Wartung.** Die Rolle des Menschen im Bereich Service und Wartung ist nicht zu vernachlässigen, vor allem bei der Diagnose, Reparatur sowie technischen Unterstützung und Kundendienst. Zwar übernehmen moderne Maschinen häufig Teile der Diagnose und Wartung selbst, doch ist die menschliche Kompetenz in Form von Fachwissen und praktischer Erfahrung entscheidend, um Assistenzsysteme effizient zu nutzen. Diese Symbiose aus Technik und Mensch gewährleistet das reibungslose Funktionieren und die Langlebigkeit von Produkten und Produktionsanlagen und steigert somit die betriebliche Gesamteffizienz (Vogel-Heuser et al. 2017b).

Die Rolle der Arbeitnehmer verändert sich in einer intelligenten Fabrik erheblich. Die Umsetzung eines soziotechnischen Ansatzes für die Arbeitsorganisation wird den Arbeitnehmern die Möglichkeit bieten, mehr Verantwortung zu übernehmen und ihre persönliche Entwicklung zu fördern. Intelligente Fabriken sind hochkomplexe, dynamische und flexible Systeme, die befähigte Mitarbeiter benötigen, welche als Entscheidungsträger und zur Überwachung einsetzbar sind. Ein sicheres und integratives Arbeitsumfeld fördert die körperliche und geistige Gesundheit sowie das Wohlbefinden und stärkt darüber hinaus die Grundrechte der Arbeitnehmer hinsichtlich Autonomie, Menschenwürde und Privatsphäre. Auch zukünftig werden sich Industriearbeiter ständig weiterbilden müssen, um den Anforderungen der Arbeitswelt gerecht zu werden bzw. zu bleiben. Bei ihrer Tätigkeit werden sie von intelligenten Assistenzsystemen entlastet und unterstützt, indem Routineaufgaben reduziert werden, so dass sie sich auf kreativere und wertschöpfende Tätigkeiten konzentrieren können. Eine flexible Arbeitsorganisation wird gefördert, um allen Arbeitnehmern eine effektivere berufliche Weiterentwicklung und eine bessere Vereinbarkeit von Beruf und Privatleben zu ermöglichen. Die entsprechenden Technologien werden die physische Belastung verringern und somit auch älteren und eingeschränkten Arbeitnehmern ermöglichen, am Arbeitsleben teilzuhaben und länger produktiv zu bleiben.

4 Bedeutung der Mensch-Maschine Kollaboration und Werkzeuge der Industrie 5.0

Die effektive Mensch-Maschine Kollaboration fördert eine nahtlose Zusammenarbeit und verbesserte Produktivität in unterschiedlichen industriellen Kontexten. Exoskelette, kollaborative Roboter (Cobots), AR- und Virtual Reality (VR)-Anwendungen, autonome mobile Roboter und die Integration digitaler Menschmodelle als digitale Zwillinge (DZ) sind Beispiele für Technologien, die eine Mensch-Maschine Kollaboration und deren Entwurfsprozess unterstützten. Aufgaben, die ein Mensch bisher nicht alleine oder nur schwer bewältigen konnte, werden kollaborativ mit den Ma-

<u>Robotik</u> • Kollaborative Roboter • Services Roboter, z.B., autonome mobile Roboter • Teleoperation/Telepräsenzroboter	<u>System Integration</u> • Cyber-Physische Systeme (CPS) • Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS)	<u>Ergonomische Technologien</u> • Exoskelette • Menschsimulation • Method-Time Measurements (MTM)
<u>Additive Manufacturing</u> • 3D-Drucker	<u>Information und Datenaustausch</u> • Dynamische Prozessplanung • Ontologie • AML, OPC UA, ECLASS • NOAH (Prozessindustrie)	<u>Interaktionstechnik zwischen Menschen und Maschinen</u> • Augmented und Virtual Reality (AR/VR) • Gesten- und Spracherkennung • Berührungsschnittstellen
<u>Intelligente Sensorik/Aktoren</u> • 3D-Kamera • RFID-Sensoren • Aktive Bremsen	<u>Internet der Dinge</u> • Cloud Computing	
	<u>Digitaler Zwilling (DZ)</u> • Verwaltungsschale (VWS) • 3D-Modellierung und -Simulation	
	<u>Datensicherheit</u> • Verschlüsselung und Authentifizierung	
<u>Netzwerk und Kommunikation</u> • 5G/6G Netzwerk • Multi-Agenten Systeme (MAS) • Domain Specific Language (DSL)	<u>Künstliche Intelligenz (KI)</u> • KI-Algorithmen, z.B., natürliche Sprach-verarbeitung (NLP) • Generative AI • Computer Vision (CV) • Maschinelles Lernen (ML), z.B., Objekterkennung	

Abb. 2 Überblick der Technologien von Industrie 5.0 (in Anlehnung an Demlehner und Laumer (2020))

schinen ausgeführt. In der Fabrik der Zukunft muss der menschliche Arbeiter flexibel und anpassungsfähig sein und mit fortschrittlichen Technologien zusammenarbeiten können. Aufgrund des herrschenden Arbeitskräftemangels sollten die verfügbaren Personen durch Assistenzsysteme entsprechend ihren Fähigkeiten geeignet unterstützt werden.

Um das Potenzial von Technologien wie natürlicher Sprachverarbeitung (NLP), maschinellern Lernen und künstlicher Intelligenz (KI) zu maximieren, sollten menschenzentrierte Designprinzipien genutzt werden. Die besonders relevanten Technologien und Werkzeuge der Industrie 5.0 wurden in Abb. 2 nach Domänen angeordnet.

4.1 Die Integration des Menschen in den digitalen Zwilling der Industrie 5.0

Der DZ ermöglicht es in den Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus, der Elektroindustrie sowie der Prozessindustrie, Produktionsabläufe und Produkte weiter zu optimieren und so erfolgreich am globalen Wettbewerb teilzunehmen. Der DZ ist eine virtuelle Abbildung von Produkten, Produktionsprozessen und Produktionsmaschinen. Im DZ finden sich Informationen aller Lebenszyklusphasen von der Entwicklung über Produktion bis zum Betrieb wieder. Alle digital verfügbaren Informationen eines Produkts, dessen Produktionsprozesses bzw. der Maschine, auf der es produziert wurde, sollten im DZ vereint sein. Ebenso sollten Menschmodelle geeignet integriert werden, wenn diese bei Produktionsprozessen beteiligt sind.

Der DZ sollte alle digital zugänglichen Entwurfsmodelle und -dokumente des kompletten Lebenszyklus der Produktentstehung beinhalten (Abb. 3). Derzeit wird als DZ häufig lediglich ein simulationsfähiges 3D-Modell des Produktes ohne dessen Produktionsdaten bereitgestellt.

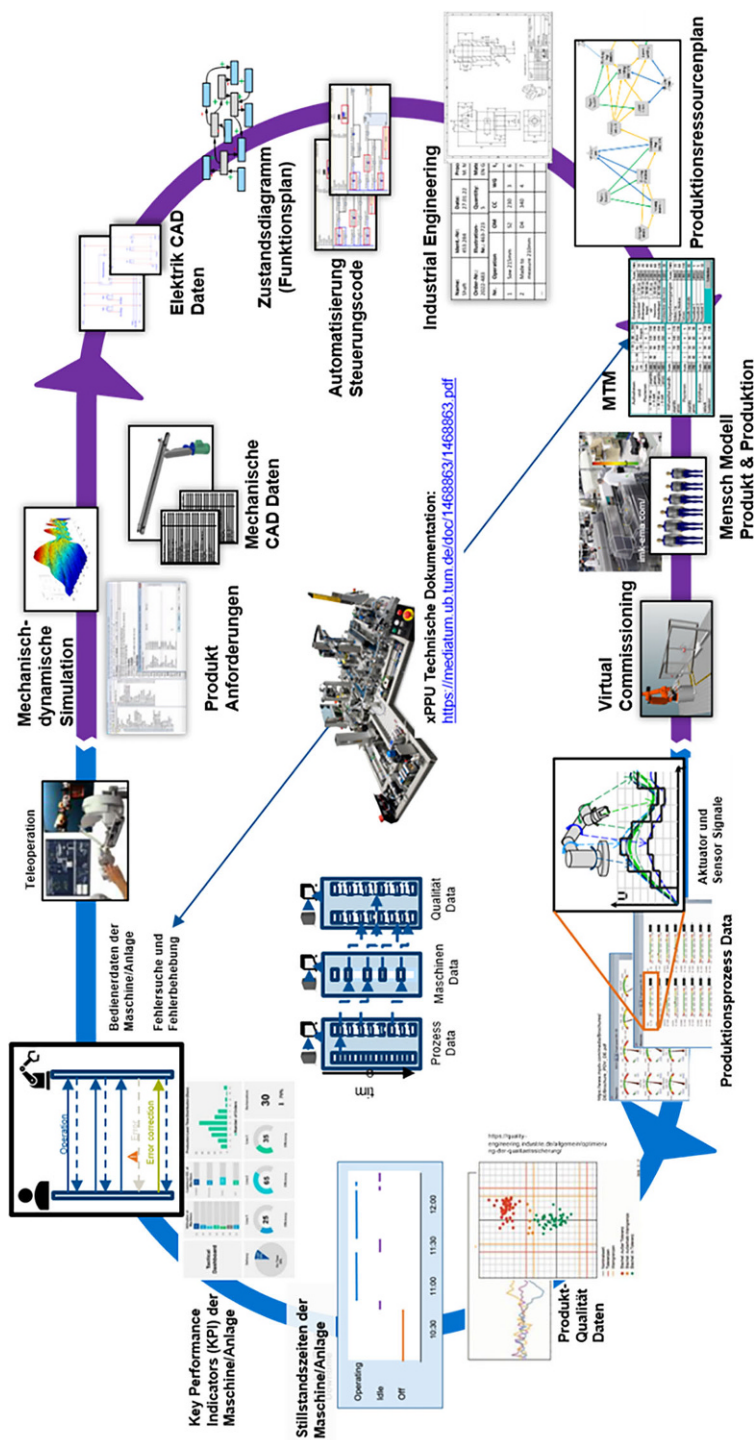


Abb. 3 Artefakten in der Entwicklungs- und Betriebsphase eines digitalen Zwillings

Nur durch eine Kopplung menschlicher Modelle (Anthropometrie, Verhalten und Kognition) als DZ mit den DZ der Produktionsprozesse und -ressourcen kann der Entwurf eines Mensch-Maschine Arbeitsplatzes, wie häufig in der Montage vorhanden, gelingen und aufwändige Labor- und Feldversuche im Vorfeld der Einführung reduzieren (Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt 2017).

Die Modellierung des Menschen ist eine zentrale Aufgabe, die zur Entwicklung eines ergonomischen und menschenzentrierten Arbeitsumfelds beiträgt. Manuelle Arbeitsabläufe wie beispielsweise das Handhaben von Werkstücken zur anschließenden Weiterverarbeitung werden mittels Method-Time Measurements (MTM) (Gomberg et al. 1949) analysiert und liefern somit Informationen, die ein möglichst menschenzentriertes Design des Arbeitsraums ermöglichen. Um dies zukünftig effizient durchzuführen, muss der DZ im Sinne der I5.0 auch ein Mensch-Modell enthalten. Dies ist bisher nicht erreicht.

Auch die Integration späterer Entwicklungs- und Betriebsphasen sollte im Sinne einer Circular Economy von der Beschaffung über Produktion und Verwendung bis hin zum Recycling dem DZ hinzugefügt werden. Durch die Anreicherung des DZs mit historische Daten aus dem Betrieb könnten sich Konstruktionsfehler oder -abweichungen erkennen und in der Folge beheben lassen. Insbesondere die Aufzeichnung manueller Interaktionen mit der Maschine liefert die Möglichkeit zur kontinuierlichen ergonomischen Optimierung. Das Konzept des DZs ist somit weit mehr als nur ein einzelnstehendes unilaterales Simulationsobjekt. Es zeichnet sich vielmehr durch seine kontinuierliche Interaktion mit dem realen Produkt aus.

4.1.1 Die Nutzung des digitalen Zwillings in der Verwaltungsschale

Die *Plattform Industrie 4.0* (Plattform Industrie 4.0 2023) verfolgt die Verwaltungsschale (VWS, englisch Asset Administration Shell, AAS) als standardisiertes Konzept. Die VWS definiert eine Datenstruktur, die alle relevanten Informationen eines Produkts oder Prozesses in einzelnen „Submodellen“ organisiert. Häufig werden eigene Submodelle für den Betrieb, Physikalische Komponenten und Administrative Informationen (z. B. Seriennummer, CE-Kennzeichnung) in der digitalen Beschreibung eines Gerätes (Assets) verwendet. Die Struktur solcher wiederverwendeten Submodelle ist ebenfalls Teil des Standardisierungsprozesses. Innerhalb eines Submodells können konkrete Eigenschaften des Produkts durch Property-Elemente beschrieben werden (z. B. „Gewicht“= 2 kg), die per Definition immer einen Datentyp und eine Einheit aufweisen. Referenzen bieten darüber hinaus die Möglichkeit auf herstellerspezifische Dokumente zu verweisen. In beiden Fällen bietet die VWS die Möglichkeit der semantischen Annotation solcher Submodel-Elemente durch Verweise auf global definierte Bezeichnungen, die unter anderem im ECLASS Standard hinterlegt sind.

Die manuelle Erstellung einer VWS im Sinne der I5.0 ist aus industrieller Sicht zu aufwändig. Deshalb muss aus den bestehenden Engineering-Daten automatisch die VWS generiert werden (Zhao et al. 2023). Bei diesem Ansatz werden Informationen automatisch aus Dokumenten wie Datenblättern oder 3D-Modellen extrahiert und anschließend in VWS Submodelle organisiert. Entscheidend ist hierbei den extra-

hierten Elementen eine semantische Bedeutung, beispielsweise nach dem ECLASS Standard, zuordnen zu können.

Die offenen Datenstandards Standard for the Exchange of Product Data (STEP) und Unified Robotic Description Framework (URDF) unterstützen durch automatische VWS-Generierung aus CAD-Daten einen automatische VWS-Integrationsprozess. In STEP sind die 3D Informationen im ASCII Format in jeweils einzelnen Zeilen der Datei hinterlegt. Die meisten Zeilen einer solchen Datei definieren dabei einzelne Punkte in einem (kartesischen) Koordinatensystem, welche wiederum für die Definition komplexerer Geometrieobjekte wie Splines und Flächen verwendet werden. Außerdem können weitere für das 3D-Modell relevante Eigenschaften wie Schwerpunkt oder Masse definiert werden. Solche Eigenschaften des Modells können automatisiert extrahiert und mit den entsprechenden semantischen Referenzen aus ECLASS verknüpft werden, bevor sie als Merkmale in die VWS eingefügt werden. Durch die Integration dieser Informationen des 3D-Modells als explizite Eigenschaften des DZs lässt sich ein schneller und konsistenter Datenaustausch sicherstellen. Das eigentliche Modell kann mit einer Referenz in die VWS inkludiert werden und wird somit ebenfalls Bestandteil des DZs.

Im Bereich der Robotik findet auch das XML basierte URDF zur Definition der Hardwarestruktur eines Assets Anwendung. In einer URDF-Datei werden unter anderem die Gelenke und Verbindungen eines Roboters und deren Verknüpfungen definiert. Die detaillierte Beschreibung der Geometrie erfolgt in verlinkten Mesh-Dateien. Die XML-Elemente der einzelnen Gelenke und Verbindungen können aus der URDF-Datei extrahiert werden und nach semantischer Annotation mittels ECLASS als Properties in die VWS innerhalb eines „Geometrie-Submodels“ eingefügt werden.

Um die Konsistenz zwischen verschiedenen CAD-Beschreibungen sicherzustellen, kann ein DZ (über VWS) die Ansätze für die STEP- und URDF-Integration kombinieren. Der DZ verweist somit nicht nur auf CAD-Daten, sondern die CAD-Daten sind ein integraler Bestandteil der digitalen Datenstruktur, die das reale Produkt abbildet. Die automatisierte VWS-Generierung reduziert den Erstellungsaufwand eines DZs stark, da die VWS als ein Produkt des Entwicklungsprozesses entsteht.

Im Zuge der I5.0 und der Integration des Menschen in virtuelle Planungsprozesse gewinnt die Integration von CAD in den DZ weitere Bedeutung. Durch explizite Hinterlegung geometrischer Abmaße eines Produkts, als Properties in der VWS, kann beispielsweise eine ergonomische Eignung evaluiert werden. Aus den URDF-Daten können Informationen zum Kollisionsbereich und -verhalten im digitalen Zwilling integriert werden, die insbesondere für die Planung kollaborativer Arbeiten entscheidende Informationen liefern.

4.1.2 Herausforderungen und Ansätze für die Entwicklung von Industrie 5.0 digitalen Zwillingen

Eine entscheidende Herausforderung für die Verbreitung des DZ ist die Standardisierung von Datenformaten, um eine Interaktion verschiedener DZ zu ermöglichen. Die Vielzahl und die Heterogenität der zu integrierenden Daten erschweren die Entwick-

lung eines solchen Datenformats. Die Implementierung des DZ umfasst Werkzeuge, die für 3D Repräsentation, Simulation sowie die kontinuierliche Datenintegration, Aufbereitung, Verarbeitung und Speicherung notwendig sind. Der DZ ist eng mit Technologien wie dem Internet of Things und Big Data Methoden verbunden. Durch das Internet of Things stellen Geräte ihre Laufzeitdaten über das Internet global zur Verfügung. Big Data Methoden ermöglichen die Handhabung und Analyse der hohen Datenflut von Produktionsanlagen. In einzelnen Fachbereichen wird zunehmend auf das Datenformat AutomationML (AutomationML 2023) gesetzt, während sich für Laufzeitdaten der OPC-UA Standard (OPC Foundation 2023) etabliert. Jedoch müssen auch weitere Informationen wie Wartungsintervalle oder Wartungsprozeduren für Maschinen in einem DZ hinterlegt sein, für die es bisher keine standardisierten Formate gibt.

In der I4.0 ist der Begriff des DZ weitestgehend auf physikalisch existierende Objekte sowie vereinzelt auf Produktionsprozesse bezogen. Virtuelle Abbildungen von Produkten wie Automobilen werden genutzt, um besser Kundenanforderungen abdecken zu können. DZ der Produktionsanlagen werden verwendet, um die Effizienz der Fertigung eben jener Produkte zu steigern. Der Mensch nimmt im Kontext des I4.0 DZ keinen besonderen Stellenwert ein. Allenfalls wird er als Randbedingung bei der Inbetriebnahme oder Bedienung betrachtet. Im Zuge der I5.0 muss sich auch das Konzept des DZ zu einem menschenzentrierten Ansatz entwickeln. Der Mensch muss aktiver Teil der digitalen Repräsentation von Produkten und Produktionsmitteln werden. Eine weitere Herausforderung für die Entwicklung des DZs der I5.0 sind somit die Modellierung des Menschen sowie die kontinuierliche Integration von Daten der menschlichen Interaktionen mit dem Produkt.

Um dies zu erreichen ist der DZ zu erweitern und die Menschmodellierung zu integrieren. Diese Modelle erlauben eine Entwicklung von I5.0 Maschinen und Anlagen, bei denen menschlichen Eigenschaften und Bedürfnisse einbezogen werden. Auch im weiteren Verlauf kann das entwickelte Menschmodell genutzt werden, um die Eignung der Anlage im Betrieb sicherzustellen und weiter zu optimieren. Konkret werden im Folgenden drei zusammenhängende Bausteine für die Integration eines Menschmodells in den DZ vorgestellt (vgl. Abb. 4).

In einem ersten Schritt zum Aufbau eines Menschmodells für einen industriellen Prozess werden automatisierte MTM verwendet. Hierbei werden beispielsweise die Gelenkpunkte bei sich wiederholenden menschlichen Bewegungen aufgezeichnet. Somit können Optimierungsprozesse Realdaten nutzen. MTMs hängen immer vom individuell betrachteten Menschen ab, woraus sich besondere Möglichkeiten für hoch individual-optimierte Arbeitsplätze ergeben. So können in einem DZ beispielsweise bekannte Möglichkeiten zur Handhabung eines Werkstücks hinterlegt werden. Wird nun während der Laufzeit mittels MTM bei einem Menschen ein bestimmtes Muster erkannt, kann der weitere Prozess optimal darauf angepasst werden. Durch solch eine datengestützte Personalisierung in Kombination mit der Nutzung von maschinellem Lernen und KI-Techniken zur Analyse von historischen Daten, Benutzerpräferenzen und Kontextinformationen, können personalisierte digitale Zwillingmodelle für einzelne Benutzer erstellen werden. Mit diesem Ansatz wird die Umgebung des DZs auf die spezifischen Bedürfnisse und Eigenschaften jedes Nut-

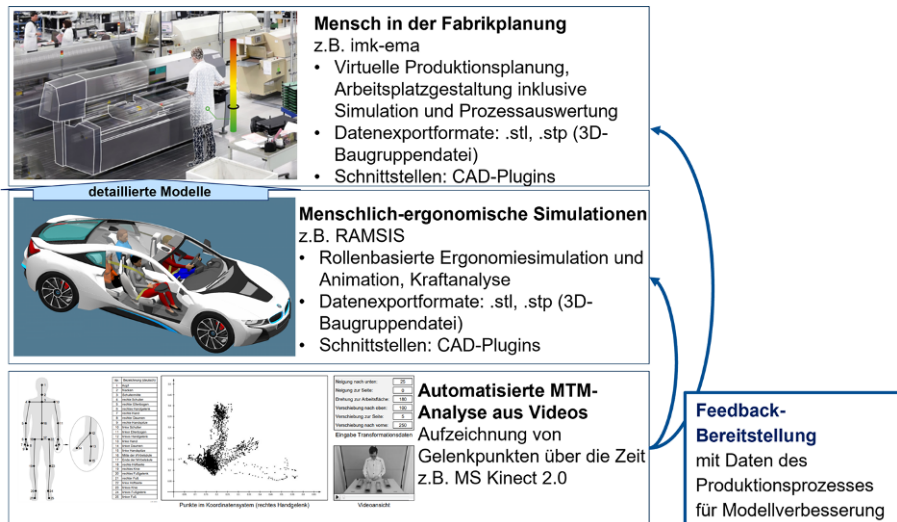


Abb. 4 Aspekte der Integration des Menschmodells in detaillierte digitale Fabrik Zwillinge (Grafiken aus: oben, imk (2023); mitte, Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt (2017); unten Benter (2018))

zers zugeschnitten, wodurch die Relevanz und Effektivität des DZs verbessert und der Nutzen für den einzelnen Menschen offenbart wird.

Eine zweite Möglichkeit den Menschen besser in die Produktentwicklung zu integrieren sind Ergonomie-Simulationen. Diese ermöglichen eine quantitative Bewertung der Gebrauchstauglichkeit (Usability) von Produkten, so dass sich Produkte noch in der Entwicklungsphase hinsichtlich ihrer Eignung bewerten und optimieren lassen. Solche Simulationen leisten einen wichtigen Beitrag in der Design Phase. Durch sie können mögliche Probleme im späteren Umgang mit dem Produkt frühzeitig erkannt und verhindert werden. Für solche Simulationen können existierende fortschrittliche Menschmodelle wie RAMSIS, JACK oder Santos in die Umgebung des DZs integriert werden, um menschliche Faktoren, Ergonomie und Biomechanik für I5.0 relevante Aspekte zu analysieren (Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt 2017). Diese Modelle bieten eine detaillierte Darstellung der menschlichen Anatomie, Bewegungen und Körperhaltungen und ermöglichen die Bewertung von Faktoren wie Komfort, Sicherheit und Zugänglichkeit in verschiedenen Verwendungsszenarien. Durch die Einbindung dieser Menschmodelle in den DZ können Designer und Ingenieure die Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung optimieren, um den menschlichen Bedürfnissen besser gerecht zu werden und die allgemeine Benutzererfahrung zu verbessern.

Simulationen wie imk-ema zur prospektiven Planung, Gestaltung und Optimierung von menschlicher Arbeit erlauben den Aufbau detaillierter Fabrikmodelle, die explizit den Menschen mit einbeziehen (imk 2023). So wird der Mensch bei der Produktionsplanung und Arbeitsplatzgestaltung bereits in der frühen Entwicklung berücksichtigt und vollständig in den Produktionsprozess eingebunden. Die aus den detaillierten Modellen final entstandene digitale Repräsentation kann genutzt werden, um die Eignung von Arbeitsplätzen an Maschinen und Anlagen sowie in ganzen

Fabriken bereits vor dem Aufbau zu bewerten und im Betrieb kontinuierlich zu überwachen und zu verbessern.

Um industrielle Anwendung zu finden, können existierende Tools als Plugins für CAD-Anwendungen genutzt werden, die gängige Datenformate wie Standard Transformation Language (STL) (3D Systems 2023) und STEP (ISO 2016) unterstützen. Dies ist ein erster Ansatzpunkt, um auch die Menschmodellierung im DZ auf einen standardisierten Weg zu führen, der Interoperabilität zwischen den virtuellen Produkten verschiedener Hersteller erlaubt.

Auch die kognitiven Prozesse des Menschen bei der Interaktion und Kollaboration mit dem Produktionsumfeld sollten Teil der Modellierung werden. Die kognitiven Prozesse und Entscheidungsstrategien der menschlichen Nutzer können in Computermodellen erfasst werden, welche in den DZ integriert werden. Menschliches Verhalten kann so mit dem digitalen Zwilling simuliert und vorhergesagt werden, um ein besseres Verständnis zu erlangen, wie Personen auf verschiedene Szenarien oder Veränderungen in der Umgebung reagieren. Konkrete Anwendungsfälle, bei denen kognitive Modelle unterstützen, sind Schulungen, Designoptimierungen und Sicherheitsanalysen.

Der DZ erzielt damit den Mehrwert, dass operationelle Daten reale Abläufe in Echtzeit widerspiegeln und so nicht nur Probleme vorzeitig erkannt, sondern Prozesse kontinuierlich optimiert werden können. Die automatisierte MTM-Analyse während der Laufzeit soll somit immer weiter zur Verbesserung der Modelle für die Ergonomiesimulation und Fabrikplanung genutzt werden. Damit entsteht eine kontinuierliche Bewertbarkeit und mögliche Verbesserung der ergonomischen Eignung von I5.0 Prozessen.

Operationelle Daten müssen daher nicht nur von Sensorik an der Maschine gesammelt werden, sondern werden in der I5.0 auch vom Menschen an seinen DZ weitergegeben. Eine menschen-sensorbasierte Datenintegration kann beispielsweise durch Verwendung von tragbaren Sensoren, wie z.B. intelligenter Kleidung, Armbänder oder anderer biometrischer Geräte, erfolgen, um Echtzeitdaten über den physiologischen Zustand, die Bewegungen und die Aktivitäten des Benutzers zu sammeln. Diese Daten können dann für ein virtuelles Abbild der Person innerhalb der digitalen Zwillingsumgebung verwendet werden, was eine genaue Modellierung der menschlichen Interaktionen und Reaktionen ermöglicht.

Die direkte Einbeziehung menschlicher Eingaben und Entscheidungen in den Simulationsprozess des DZs wird durch eine sogenannten Human-in-the-Loop Integration erreicht. Hierzu muss dem Benutzer eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden, die es ihm ermöglicht, mit dem digitalen Zwilling in Echtzeit zu interagieren und ihn zu manipulieren, z. B. durch Systeme der VR oder AR. Die Entscheidungen und Handlungen des Menschen werden dann in die Simulation des DZs integriert und werden in dessen Verhalten und Ergebnissen berücksichtigt.

Über die Integration eines einzelnen Nutzers hinaus sollten auch die soziale und kollaborative Interaktion mehrerer menschlicher Nutzer in die digitale Zwillingsumgebung integriert werden, um Zusammenarbeit, Kommunikation und gemeinsame Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Dies kann durch vernetzte virtuelle Umgebungen oder kollaborative Plattformen erleichtert werden, die es den Benutzern ermöglichen, in Echtzeit mit dem DZ und untereinander zu interagieren.

4.2 Technologien für die Realisierung menschenzentrierter Produktionsumgebungen

AR- und VR-Technologien spielen eine zentrale Rolle bei der Realisierung von digitalen Umgebungen. Dabei erstrecken sich die Anwendungsfelder über die Produktion und digitale Fabrik hinaus auch auf Bereiche wie Gesundheitswesen und Bildung. Diese Technologien sind inhärent menschenzentriert, da sie den Benutzer in den Mittelpunkt der Erfahrung stellen und ihm eine natürlichere und intuitivere Interaktion mit digitalen Informationen und Objekten ermöglichen. Die Technologien unterscheiden sich im Grad der Virtualisierung, die dem Menschen bereitgestellt wird. Die AR-Technologie ermöglicht es dem Benutzer, digitale Informationen in die physische Welt einzublenden und so eine gemischte Realität zu schaffen. In der Produktionsumgebung kann AR eingesetzt werden, um den Mitarbeitern Informationen und Anweisungen in Echtzeit zur Verfügung zu stellen und so die Effizienz zu steigern und Fehler zu reduzieren. Die VR schafft eine vollständig immersive digitale Umgebung, die für Schulungs- und Simulationszwecke genutzt werden kann. In der virtuellen Fabrik können verschiedene Produktionsszenarien simuliert werden, so dass die Mitarbeiter verschiedene Prozesse in einer sicheren und kontrollierten Umgebung üben und testen können. Aufgaben, die zunächst in einer virtuellen Umgebung ausgeführt und optimiert wurden, können anschließend auf den realen Prozess übertragen werden. Beide Technologien bieten die Möglichkeit Produktionsprozesse fernzusteuern, in dem Bedienern eine zusätzliche virtuelle Schnittstelle zu den realen Produktionsabläufen bereitgestellt wird.

Maschinelles Lernen und KI-Technologien können zur Analyse großer Datenmengen, die im Produktionsumfeld entstehen, eingesetzt werden. Die Erkennung von Mustern, beispielsweise von wiederkehrenden Fehlersequenzen, ist für Menschen oft nur schwer oder gar nicht möglich. Diese Technologien können zur Optimierung von Produktionsprozessen und zur Verbesserung der Qualitätskontrolle eingesetzt werden.

NLP ermöglicht es Maschinen, die menschliche Sprache zu verstehen und zu interpretieren, wodurch eine natürlichere Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ermöglicht wird. Die Einsatzmöglichkeiten von NLP Methoden im Produktionsumfeld sind vielfältig. Steuerungssysteme von Anlagen können sprachbasiert entwickelt werden um die Interaktion des Bedieners zu flexibilisieren. Die Steuerung einer Anlage muss beispielsweise nicht mehr auf einer starren Abfolge von Hardwareeingaben beruhen, sondern erfolgt durch eine für den Menschen natürliche Kommunikation mit der Maschine. Chatbots oder virtuelle Assistenten können den Menschen beispielsweise bei Wartung und in Fehlerfällen unterstützen und bieten im Vergleich zu rein textbasierten Prozeduranweisungen Potenzial die Nutzererfahrung zu verbessern.

Neben allgemeinen Technologien und Methoden für die Realisierung der I5.0 Produktionsumgebungen wurden konkrete Roboter und Werkzeuge entwickelt, die im menschenzentrierten Umfeld zum Einsatz kommen. Exoskelette, Assistenzsysteme mit haptischem Feedback sowie Gestenerkennungssysteme sind menschenzentrierte Entwicklungen, die eine Mensch-Maschine Kollaborationen realisieren. Insbeson-

dere im Bereich der Robotik gibt es gezielte Entwicklungen für Systeme, die in einer gemeinsamen Umgebung mit Menschen ihre Aufgaben erfüllen.

Ein Exoskelett ist ein tragbares Gerät, das die Kraft und Mobilität der Nutzer erhöht. Motoren oder Hydraulik sind an einem Rahmen oder einer Schale befestigt, werden körpernah getragen und bieten zusätzliche Kraft und Unterstützung für den Nutzer. Exoskelette können in der Produktion eingesetzt werden, um die körperliche Belastung der Arbeiter zu verringern, so dass sie repetitive oder schwere Aufgaben leichter ausführen können und das Verletzungsrisiko verringert wird.

Haptisches Feedback erlaubt es dem Menschen sehr gezielt mit seiner Umgebung durch Berührung zu interagieren. Technische Systeme können durch die Bereitstellung von haptischem Feedback eine präzisere und intuitivere Steuerung durch Menschen ermöglichen. Derartige Geräte ermöglichen eine taktile Kommunikation zwischen Mensch und Maschine, indem sie als Reaktion auf Benutzerinteraktionen physische Empfindungen wie Vibrationen, Druck oder Widerstand erzeugen. Haptisches Feedback kann die Präzision und Intuitivität von Mensch-Maschine-Schnittstellen verbessern und ermöglicht es dem Nutzer, virtuelle wie reale Objekte zu manipulieren und Robotersysteme effektiver zu steuern.

Durch die Interpretation menschlicher Gesten mittels Sensoren und Computer-Vision-Algorithmen ermöglichen Gestenerkennungssysteme eine natürlichere und intuitivere Kommunikation zwischen Mensch und Maschine. Diese Technologie kann eingesetzt werden, um Maschinen zu steuern, virtuelle Objekte zu manipulieren oder mit digitalen Schnittstellen zu interagieren, ohne dass ein Körperkontakt erforderlich ist.

Es gibt eine Vielzahl an Spezialrobotern, die den Menschen in spezifischen Umgebungen – auch außerhalb des traditionellen industriellen Umfelds – unterstützen, mit ihm interagieren und Aufgaben für ihn übernehmen. Insbesondere Serviceroboter sind oftmals für die Unterstützung von Menschen in einer Reihe von nicht-industriellen Umgebungen konzipiert, wie z.B. zu Hause, in Büros, Krankenhäusern und Hotels. Im Kontext der I5.0 werden auch solche Roboter benötigt, da sich der Fokus der gesamten Produktionsumgebung nicht mehr ausschließlich auf die reine Fertigung beschränkt, sondern auch auf die Erfüllung allgemeiner menschlicher Bedürfnisse. Andere Roboter-Konzepte fokussieren sich auf den Einsatz in gemeinsam genutzten Umgebungen, wo sie mit der Öffentlichkeit interagieren und oft Informationen, Anleitung oder Hilfe bieten. Sie sind in der Regel so konzipiert, dass sie ansprechbar, benutzerfreundlich und sicher für die menschliche Interaktion sind. Beispiele für Roboter im öffentlichen Raum sind Autonome mobile Roboter (AMRs) oder Teleoperation/Telepräsenzroboter. AMRs sind selbstfahrende Roboter, die sich ohne menschliches Eingreifen in ihrer Umgebung bewegen und navigieren können, wie etwa durch eine Fabrik oder ein Lagerhaus. AMRs können dabei für eine Vielzahl von Aufgaben in der Produktion eingesetzt werden, z.B. für den Materialumschlag, die Bestandsverwaltung und die Qualitätskontrolle. Für diese Aufgaben finden AMRs neben der Industrie auch im Gesundheitssektor Anwendung. Teleoperation- und Telepräsenzroboter ermöglichen die Kommunikation und Interaktion aus der Ferne, indem sie Personen, die nicht vor Ort sein können, eine physische Präsenz bieten. Teleoperationsroboter bieten Nutzern die Möglichkeit aus der Ferne mit der Umgebung zu interagieren und Objekte zu manipulieren. Sie finden häufig

in Bereichen Einsatz, die für den Menschen gefährlich oder unzugänglich sind. Im Produktionskontext können sie eingesetzt werden, um Verklemmungen zu lösen, Robotern neue Fähigkeiten zu lehren oder schnelle Hilfeleistung zu geben (Kaynar et al. 2022). Telepräsenzroboter können in Kontexten wie Fernunterricht, Konsultationen im Gesundheitswesen oder Geschäftsbesprechungen eingesetzt werden und ermöglichen es den Benutzern über Video- und Audioverbindungen zu kommunizieren und zusammenzuarbeiten.

4.3 Technologien und Werkzeuge in einem Anwendungsbeispiel des Industrie 5.0 digitaler Zwilling im kollaborativen Montageprozess

In einem konkreten Anwendungsbeispiel wird ein Montageprozess eines Getriebes betrachtet, der gemeinsam von einem Menschen und einem kollaborativen Roboter mit Drehmomentsensoren durchgeführt wird. Sowohl das Getriebe selbst wie auch der Roboterarm und der Mensch werden als DZ repräsentiert, um den kollaborativen Montageprozess zu optimieren.

Das Getriebe sowie der Roboterarm können mit VWS von den jeweiligen Herstellern beschrieben werden. Hierbei sollen zum einen notwendige Daten für 3D Repräsentation und Simulation geliefert werden, zum anderen alle Informationen, die für die menschliche Interaktion entscheidend sind. Für das Getriebe beinhaltet dies Montageanleitungen und Handhabungshinweise; für den Roboterarm beispielsweise eine Beschreibung des Kollisionsverhaltens.

Der manuelle Montageprozess wird mittels MTM analysiert und so ein Menschmodell aufgebaut, in dem bereits Kenntnisse gewisser Bewegungsabläufe vorhanden sind.

Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Interaktion der DZ, da die bekannten menschlichen Bewegungsabläufe bei der Robotersteuerung berücksichtigt werden müssen.

Ist die Robotersteuerung vorläufig entwickelt, werden die Modelle über ein offenes Datenformat wie STEP in einer Ergonomie-Simulationsumgebung zusammengeführt und der kooperative Zusammenbau zunächst simuliert. Nach eventuellen Iterationen kann der gesamte Mensch-Roboter Arbeitsplatz in eine übergeordnete Simulation der Fabrik einbezogen werden, die beispielsweise die Anlieferung der Bauteile beinhaltet.

Der entscheidende Nutzen des DZs entsteht nun, wenn die Simulation weiter mittels Laufzeitdaten fortgeführt wird. Hier stellt der Roboterarm seine operationellen Daten per OPC-UA zur Verfügung und das menschliche Verhalten wird kontinuierlich mittels MTM überwacht. Der kollaborative Montageprozess kann somit kontinuierlich menschenzentriert optimiert werden.

5 Schlussfolgerungen für die Implementation von Industrie 5.0

Das für die I5.0 imperative menschenzentrierte Design wird durch fortschrittliche Technologien wie den DZ, natürliche Sprachverarbeitung, maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz ermöglicht. Der Einsatz dieser Technologien hat das Ziel die

menschlichen Fähigkeiten zu verbessern und die Effizienz und Flexibilität in der Produktionsumgebung zu steigern.

Durch den Einbezug menschlicher Faktoren in diese Technologien und den damit entwickelten Anwendungen können Unternehmen präzisere, effektivere und leicht zugängliche Systeme entwickeln, die den vielfältigen menschlichen Fähigkeiten, Bedürfnissen, und Präferenzen gerecht werden. Der menschenzentrierte Ansatz der I5.0 stellt die menschliche Erfahrung in den Mittelpunkt des Designprozesses und konzentriert sich darauf, Produkte, Dienstleistungen und Systeme zu schaffen, die auf die Stärken und Schwächen des Menschen eingehen. Dies unterstützt die Entwicklung von anpassungsfähigen Systemen, die einen effizienten Produktionsablauf unter sich ändernden Marktbedingungen, Umwelteinflüssen und unvorhergesehenen Ereignissen aufrechterhalten. Die dargestellten Technologien unterstützen den Menschen sich schnell mit neuen Randbedingungen vertraut zu machen und seine Fähigkeiten flexibel und effektiv in neue Prozesse einbringen zu können.

Die Integration menschlicher Faktoren in den DZ ermöglicht eine genauere und umfassendere Bewertung potenzieller Risiken, Schwachstellen und Chancen der Produktionsumgebung. Dies erlaubt fundierte Entscheidungsfindung und proaktive Anpassung bereits vor dem Auftreten von Problemen während der Produktion.

Ein auf den Menschen ausgerichtetes Design fördert die Zusammenarbeit, die Kommunikation und das gemeinsame Lernen, wodurch eine agilere und reaktionsfreudigere Organisationskultur entsteht, die besser für die Bewältigung von Unsicherheiten und Störungen gerüstet ist. Letztendlich kann ein auf den Menschen ausgerichteter Ansatz für Technologie und Innovation zu einer nachhaltigeren, widerstandsfähigeren und menschenorientierten Entwicklung führen, die sowohl Einzelpersonen als auch Organisationen in die Lage versetzt, in einer sich ständig verändernden Welt erfolgreich zu sein.

6 Zukunft der Industrie 5.0

Mit Blick auf die Zukunft wird die Rolle des menschenzentrierten Designs bei der Förderung von Resilienz und Anpassungsfähigkeit angesichts zunehmender und komplexerer Herausforderungen weiter an Bedeutung gewinnen. Mit neuen technologischen Entwicklungen in einer immer weiter vernetzten Welt müssen Organisationen in der Lage sein, schnell und effektiv auf ein breites Spektrum von Herausforderungen zu reagieren, von Umweltkrisen bis hin zu wirtschaftlichen Störungen. Um die Herausforderungen der Zukunft zu bewältigen, müssen Unternehmen den Prinzipien der menschenzentrierten Gestaltung Vorrang einräumen und in Technologien investieren, die die menschlichen Fähigkeiten fördern, um die Effizienz und Sicherheit der industriellen Produktionsabläufe zu gewährleisten und stetig zu verbessern. Außerdem müssen sie neue Konzepte für die Aus- und Weiterbildung entwickeln, die den Mitarbeitern die Fähigkeiten und Kenntnisse vermitteln, die sie für die Arbeit mit fortschrittlichen Technologien und die Anpassung an veränderte Bedingungen benötigen. Die Zukunft der I5.0 wird von der Fähigkeit der Organisationen abhängen, die Bedeutung des Menschen bei der Entwicklung von neuen Technologien und Systeme

men zu erkennen und den Bedürfnissen von Einzelpersonen und Gemeinschaften in ihren Gestaltungsprozessen Priorität einzuräumen.

Danksagung Der Beitrag entstand im Rahmen der vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) geförderten Leuchtturm-Initiative KI.FABRIK (Phase 1: Infrastruktur- und F&E-Programm, Fördernummer DIK0249). Wir bedanken uns für die Unterstützung. Dank gilt auch den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen Fandi Bi, Theresa Prinz und Jingyun Zhao für ihre Unterstützung.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- AutomationML (2023) AutomationML. <https://www.automationml.org/>. Zugegriffen: 7. Juli 2023
- Balta E, Lin Y, Barton K, Tilbury D, Mao Z (2018) Production as a service: a digital manufacturing framework for optimizing utilization. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 13:411–413 <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2842690>
- Bednar PM, Welch C (2020) Socio-technical perspectives on smart working: creating meaningful and sustainable systems. *Information Systems Frontiers* 22:281–298 <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09921-1>
- Benter M (2018) Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras. Doctoral dissertation, Technische Universität Hamburg
- Bullinger-Hoffmann AC, Mühlstedt J (2017) Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Springer, Berlin, Heidelberg
- Dekker SWA, Woods DD (2002) MABA-MABA or abracadabra? Progress on human–automation coordination. *Cognition, Technology Work* 4:240–244 <https://doi.org/10.1007/s101110200022>
- Demlehner Q, Laumer S (2020) Why context matters: explaining the digital transformation of the manufacturing industry and the role of the industry’s characteristics in it. *Pacific Asia Journal of the Association for Information Systems* 12:3 <https://doi.org/10.17705/1pais.12303>
- Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) (2017) Industrie 4.0: Das Internet der Dinge kommt in die Fabriken. https://www.blogs.uni-mainz.de/studgen-stiftung-jgsp/files/2019/01/vorlesung_2017_wahlster_4.pdf. Zugegriffen: 7. Juli 2023
- OPC Foundation (2023) Unified architecture – OPC foundation. <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>. Zugegriffen: 7. Juli 2023
- Frey CB, Osborne MA (2017) The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Elsevier Technological Forecasting and Social Change* 114:254–280
- Gammel J, Pantförder D, Schulze T, Kugler K, Brodbeck F (2020) Who knows what in my team?—an interactive visualization-based instrument for developing transactive memory systems in team. *22nd International Conference on Human-Computer Interaction* 600–614
- Gomberg W, Maynard HB, Stegemerten GJ, Schwab JL (1949) Methods-time measurement. *Industrial And Labor Relations Review* 2:456 <https://doi.org/10.2307/2519095>

- imk Industrial Intelligence (2023) Virtuelle Produktionsplanung mit der ema Software Suite. <https://imk-ema.com/software-suite.html>. Zugegriffen: 7. Juli 2023
- ISO (2016) ISO 10303-21:2016 Industrial automation systems and integration—Product data representation and exchange—Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure. <https://www.iso.org/standard/63141.html>. Zugegriffen: 7. Juli 2023
- Karacan K, Sadeghian H, Kirschner R, Haddadin S (2022) Passivity-based skill motion learning in stiffness-adaptive unified force-impedance control. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 9604–9611
- Kaynar F, Hofbauer M, MacWilliams A, Newman J, Hutter A, Steinbach E (2022) AR in VR: augmented reality cues in 360-degree stereoscopic telepresence for remote collaboration and maintenance. 16th International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 70–77.
- Meinecke K, Land K, Jumar U, Vogel-Heuser B, Ziegltrum S, Reider M (2021) Anforderungsbasierter Test für die Validierung komplexer Automatisierungsprozesse. *at Automatisierungstechnik* 69:417–429 <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0120>
- Parasuraman R, Sheridan TB, Wickens CD (2000) A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 30:286–297 <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
- Plattform Industrie 4.0 (2023) Was ist die Plattform Industrie 4.0. <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Home/home.html>. Zugegriffen: 7. Juli 2023
- Reinhart G (2017) Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. Hanser, München
- Vogel-Heuser B, Hess D (2016) Guest editorial industry 4.0—prerequisites and visions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 13:411–413 <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2523639>
- Vogel-Heuser B, Bauernhansl T, ten Hompel M (2017a) Handbuch Industrie 4.0 Band 1 – Produktion. Springer, Berlin
- Vogel-Heuser B, Bauernhansl T, ten Hompel M (2017b) Handbuch Industrie 4.0 Band 2 – Automatisierung. Springer, Berlin
- Vogel-Heuser B, Bauernhansl T, ten Hompel M (2017c) Handbuch Industrie 4.0 Band 3 – Logistik. Springer, Berlin
- Vogel-Heuser B, Böhm M, Brodbeck F, Kugler K, Pantförder D, Zou M, Buchholz J, Bauer H, Lindemann U (2020) Interdisciplinary engineering of cyber physical production systems: highlighting the benefits of a combined interdisciplinary modelling approach on the basis of an industrial case. *Design Science* 6:e5 <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.2>
- Xu X, Lu Y, Vogel-Heuser B, Wang L (2021) Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems* 61:530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Zhao J, Vogel-Heuser B, Bi F, Ocker F, Vojanec B, Kraft A, Markert T (2023) A semi-automatic approach for asset administration shell creation from heterogeneous data. 22nd IFAC World Congress 7.
- 3D Systems (2023) What is an STL File. <https://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>. Zugegriffen: 7. Juli 2023