Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100

Qualitätssteigerung in der manuellen Montage am Beispiel einer Schraubstation

Empathische Montageassistenten in der Produktion

C. Saba-Gayoso, J. Lentes, K. Hölzle

ZUSAMMENFASSUNG Der Mensch als essenzielle Ressource der Produktion muss bei seiner Arbeit angemessen unterstützt werden. Empathische technische Systeme, die im Fraunhofer-Leitprojekt „Emotion“ erforscht werden, schaffen neue Möglichkeiten für diese Unterstützung. Auf der Grundlage eines empathischen digitalen Zwillings des Menschen wird ein System entwickelt, das unter Nutzung künstlicher Intelligenz eine weitgehende Unterstützung des Menschen bei Schraubvorgängen ermöglicht.

STICHWÖRTER

Montage, Digitalisierung, KI-basierte Assistenz

Empathic assistance for manual assembly

ABSTRACT As an essential resource in production, people must be adequately supported in their work. Empathic technical systems, which are researched in the Fraunhofer flagship project „Emotion“, create new possibilities for supporting them. Based on an empathic human digital twin, a system is developed that uses artificial intelligence to provide extensive support to humans performing screwing processes.

1 Einführung

Die Herausforderungen an produzierende Unternehmen in Deutschland steigen nach wie vor: Internationale Märkte können weiter durch Turbulenzen charakterisiert werden und die Nachfrage im Inland stagniert [1]. Demografischer Wandel und Fachkräftemangel verschärfen die Situation weiter [2]. Zur Begegnung der resultierenden Anforderungen müssen Resilienz und Effizienz der Produktion erhöht und die Qualität von Produkten und damit Prozessen gesteigert werden. Ansätze dazu werden im Fraunhofer-Leitprojekt „Emotion: Empathische technische Systeme für die resiliente Produktion“ erforscht und entwickelt [3]. Die in dem Vorhaben entwickelten empathischen technischen Systeme zielen darauf ab, Zustand und Zielsetzung anderer Entitäten oder Akteure zu verstehen und damit Entscheidungen produktionstechnischer Systeme zu leiten. Im Vorhaben werden auch Lösungen auf der Grundlage empathischer digitaler Zwillinge für den Einsatz im Kontext von Assistenzsystemen für die manuelle Montage an Schraubarbeitsplätzen untersucht. Mit den Arbeiten soll die Frage beantwortet werden, wie eine digitale Assistenz für Schraubarbeitsplätze auf der Grundlage empathischer technischer Systeme erfolgen und realisiert werden kann.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Arbeiten zur Entwicklung empathischer Assistenzsysteme für manuelle Montage an Schraubarbeitsplätzen im Projekt „Emotion“ vorgestellt. Dazu wird zunächst der Stand der Technik in Bezug auf Montageassistenzsysteme und digitale Zwillinge dargestellt. Auf dieser Basis wird Einblick in empathische technische Systeme, empathische digitale Zwillinge und die empathische Schraubassistenz in Emotion gegeben und ein Demonstrator aus dem Projekt im Sinne eines Zwischenstands vorgestellt. Abschließend folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt den Stand der Technik für digitale Zwillinge sowie im Bereich digitale Montageassistenzsysteme.

2.1 Digitale Zwillinge

Unter digitalen Zwillingen werden in diesem Beitrag informationstechnische Abbildungen von Dingen der realen Welt verstanden (siehe [4, 5]). Ziel ist dabei ein Informationsaustausch zwischen realem Ding und informationstechnischem Abbild, sodass das reale Ding in der informationstechnischen „digitalen“ Welt verfügbar wird – für dessen Planung, Überwachung oder Steuerung.

Ein anwendungsfallunabhängiges Rahmenwerk für digitale Zwillinge des Menschen (Human Digital Twin, HDT) wird von *Lin et al.* [6] auf Basis einer breit angelegten Literaturrecherche dargestellt. *Qi et al.* bieten eine Übersicht zu befähigenden Technologien sowie einen geschichtlichen Abriss zur Entwicklung digitaler Zwillinge [7].

Erste Arbeiten im Themenfeld „kognitive digitale Zwillinge“, wie die von *Li et al.* [8], binden Large Language Models (LLM) in digitale Zwillinge zur Entscheidungsunterstützung ein. *Li et al.* fokussieren dabei auf die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), allerdings mit stark vereinfachtem Betrachtungsbereich, in dem beispielsweise nur eine Hand des Menschen im MRK-System betrachtet wird. Daneben beschäftigen sich Arbeiten mit generi-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

schen Vorgehensweisen zur Entwicklung klassischer kognitiver digitaler Zwillinge, also auf der Grundlage ontologiebasierter Ansätze ohne maschinelles Lernen, wie die von *D'Amico et al.* [9].

Arbeiten zu „empathischen digitalen Zwillingen" konnten in der Literatur nicht identifiziert werden, aber *Davila-Gonzalez et al.* [10] stellen einen Ansatz zur Steigerung der Arbeitssicherheit und des Wohlbefindens von Produktionsmitarbeitenden durch KI und Emotionsanalyse vor. Zur Emotionsanalyse werden ein Chatbot, Videoauswertungen in Bezug auf Mimik und Sprache sowie Persönlichkeitstests eingesetzt. Außerdem beschäftigen sich *Li et al.* mit der empathischen Zusammenarbeit von Mensch und Industrieroboter (Mensch-Roboter-Kollaboration, MRK) [11]. Die Arbeit basiert auf zwei wesentlichen Beiträgen: einem visuellen Schlussfolgerungsansatz auf Grundlage eines kontextbasierten Szenegraphen sowie sicheren, vorhersehbaren und ergonomischen Roboterbewegungen beziehungsweise deren Planung.

2.2 Digitale Montageassistenzsysteme

Um die Beschäftigten in zukünftigen Arbeitsumgebungen zu unterstützen und die mentale Belastung bei kognitiv anspruchsvollen Tätigkeiten zu reduzieren, gewinnen Assistenzsysteme im industriellen Kontext zunehmend an Bedeutung. Assistenzbedarfe entstehen, wenn eine Lücke zwischen den Fähigkeiten der Arbeitskräfte und den Anforderungen der Aufgaben besteht [12]. Kognitiver Stress tritt beispielsweise im Montagebereich auf, etwa bei der Vorbereitung und Planung von Aufgaben sowie bei Qualitätsprüfungen (siehe [13]).

Kognitive Assistenzsysteme werden eingesetzt, um Informationen zum Montageprozess bereitzustellen und Rückmeldungen zu Arbeitsergebnissen zu geben und so die kognitive Belastung zu reduzieren. Man unterscheidet kognitive Assistenzsysteme in Wahrnehmungs- und Entscheidungsunterstützungssysteme [14], was dem Automatisierungsgrad entspricht. Diese Systeme setzen sich aus verschiedenen Hard- und Softwarekomponenten zusammen und die Interaktion zwischen den Arbeitskräften und dem Assistenzsystem führt zu einer Mensch-Maschine-Interaktion.

Aus Unternehmenssicht zielen Assistenzsysteme darauf ab, die Produktivität und Qualität zu steigern und den Montageprozess transparent, nachvollziehbar, flexibel und sicher zu gestalten [15]. Daraus folgt, dass die Gestaltungsmöglichkeiten für kognitive Assistenzsysteme vielfältig sind. Entsprechend den Anforderungen des Unternehmens stehen dabei die Bedürfnisse der Anwender im Mittelpunkt, wobei diese verschiedenen Anforderungen an die Designelemente formulieren können, welche für die spätere Akzeptanz der Systeme entscheidend sind [16].

3 Emotion-Montageassistenz

Das Montageassistenzsystem zur Unterstützung manueller Schraubvorgänge basiert auf einem modularen, empathischen digitalen Zwilling, der zunächst vorgestellt wird. Danach wird das auf dessen Basis realisierte Assistenzsystem dargestellt.

3.1 Digitaler Zwilling

Empathische digitale Zwillinge aus dem Projekt Emotion sind modular aufgebaut. Für die Kommunikation der Softwarebausteine wird ein einheitliches semantisches Datenmodell – eine Ontologie – eingesetzt. Zur Reduktion von Komplexität und zur Unterstützung der Wiederverwendbarkeit ist auch die Ontologie modular aufgebaut. Sie besteht aus einer Basisontologie auf der Grundlage bestehender, externer Ontologien sowie aus Teilontologien mit denen fachliche Perspektiven des empathischen digitalen Zwillings und des resultierenden Assistenzsystems abgebildet werden können. Zwei wesentliche Teilontologien im Kontext des Assistenzsystems für Schraubarbeitsplätze dienen der Abbildung des Menschen und des Anwendungsfalls Schrauben. Im Folgenden wird die Ontologie zur Abbildung der Perspektive Mensch beispielhaft beschrieben.

Um empathische Reaktionen durch technische Systeme informationstechnisch zu ermöglichen, müssen Informationen über Zustand und Zielsetzung des betroffenen Objekts, hier des Menschen, vorhanden sein. Klassische anthropometrische und biomechanische Menschmodelle, wie sie für ergonomische Untersuchungen eingesetzt werden, sind zur Realisierung empathischer digitaler Zwillinge des Menschen um Aspekte zu erweitern, die für den Kontext empathischer technischer Systeme im Arbeitsumfeld wesentlich sind.

Ausgangspunkt der Erweiterung klassischer Menschmodelle ist das arbeitswissenschaftliche Belastungs-Beanspruchungs-Modell, aus dem Hinweise zum Zustand des Menschen gewonnen werden können. Damit wurde ein als Ontologie modelliertes Rahmenwerk erarbeitet, dessen grundlegende Ontologie-Klassen durch Unterklassen detailliert wurden. Das Modell basiert auf der Prämisse, dass aus Arbeitsaufgabe, Arbeitsumgebung, Arbeitsorganisation und sozialem Klima arbeitsbedingte Belastungen resultieren, die unter Berücksichtigung der Ressourcen eines Menschen zu dessen Beanspruchung führen. Beanspruchungen resultieren in Folgen, die als Rückkopplung auf die Ressourcen des Individuums wirken.

Mitarbeitende haben Ressourcen, darunter nicht nur ihre Qualifikation sowie physiologische und psychische Merkmale, sondern verfügen auch über einen arbeitsbezogenen Zustand, der Zustände und Verhaltenstendenzen wie Ermüdung, ermüdungsähnlicher Zustand, Wahrnehmungsstörung sowie Überforderung oder Druck, aber auch einen produktiven Standard-Zustand sowie eine Art „Flow" umfasst. Auf Basis der dem Mitarbeitenden zur Verfügung stehenden Ressourcen resultiert aus arbeitsbedingten Belastungen eine Beanspruchung mit den entsprechenden Folgen auf die Ressourcen des Mitarbeitendens und insbesondere den arbeitsbezogenen Zustand. Da in der mitarbeiterorientierten Ontologie Merkmale vorkommen, die nicht eindeutig messbar sind, wurde eine Emotion-Merkmalsausprägung definiert, die neben Skalaren und Quantitäten auf der Grundlage der Quantities, Units, Dimensions, and dataTypes (QUDT)-Ontologie [17] der National Aeronautics and Space Administration (NASA) auch linguistische Variablen im Sinne der Theorie der unscharfen Mengen abbilden kann. Die mitarbeiterorientierte Ontologie zur Erweiterung klassischer Menschmodelle ist in **Bild 1** skizziert.

Auf Basis des Stands der Technik, vor allem von Open-Source-Software, wurden Methoden und Tools zur Zustands- und Kontexterfassung von Menschen in der Produktion entwickelt. Dazu wurden verschiedene sensorische Ansätze verfolgt. Einerseits werden Erkenntnisse über den Zustand des Menschen durch die Auswertung von Schraubkurven zu Drehwinkel- und Drehmomentverläufen des Elektroschraubers gewonnen. Andererseits erfolgt eine Aufnahme von Pose und Mimik per Kameraauswertung und Inertialsensoren. Für die reine Posenerkennung werden Inertialsensoren des „Xsens-Systems" von Movella sowie eine

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

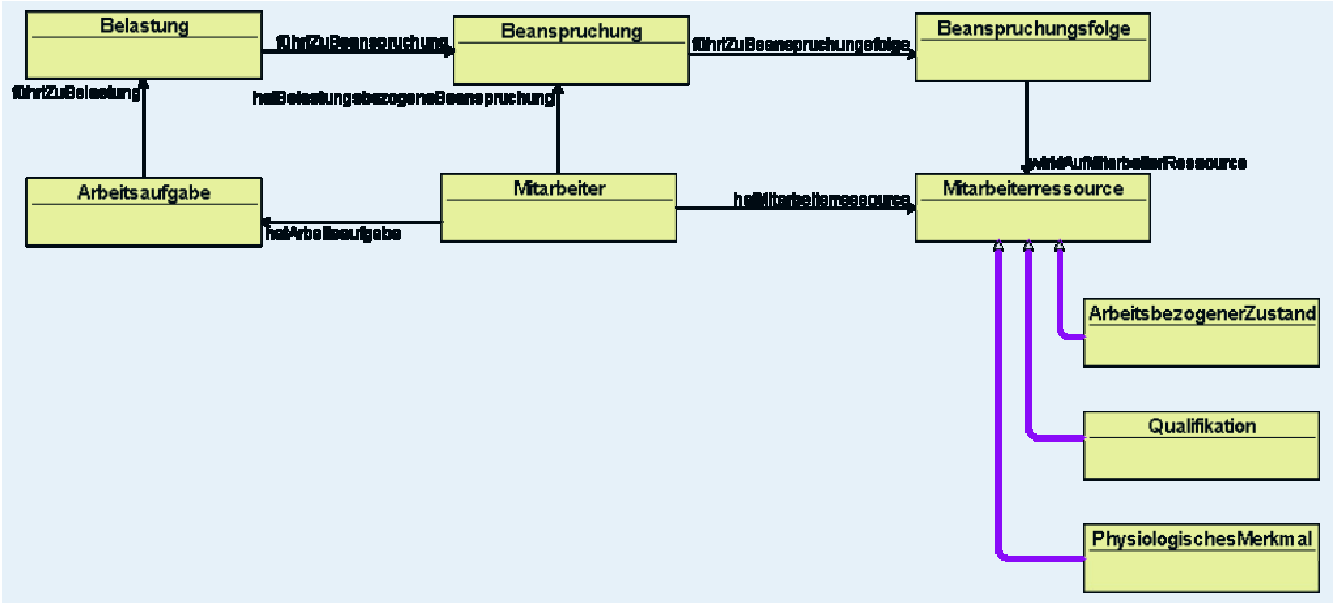

Bild 1. Ontologie zur Erweiterung klassischer Menschmodelle. *Grafik: Fraunhofer IAO*

Webcam-Auswertung auf Bais des Open-Source-Rahmenwerks „OpenPose“ [18] eingesetzt. Andererseits erfolgt eine feingranulare Auswertung von Pose und Mimik des Menschen unter Verwendung eines Microsoft Kinect-Sensors über das Google-Open-Sourc-Softwarerahmenwerk.

Der empathische digitale Zwilling des Menschen wurde mit Open-Source-Software-Bibliotheken wie „Eclipse Vert.x“ und „Apache Jena“ prototypisch entwickelt und erste Prozessketten umgesetzt. Interne Sprache für die Kommunikation der Module des digitalen Zwillings ist Web Ontology Language (OWL). So besteht ein semantisches Datenmodel , das auch nach Inbetriebnahme des Softwaresystems durch Ergänzungen weiterentwickelt werden kann. Als Sensorik-Schnittstellen wurden zunächst Anbindungen für die Xsens-Inertialsensorik sowie OpenPose zur Webcam-Auswertung realisiert. Als Ausgabe im Sinne einer Aktorik wurde zunächst eine Windows-Anzeige mit einer Auswertung der Körpergeometriedaten des betrachteten Menschen per vereinfachtem Rapid Upper Limp Assessment (RULA) [19] umgesetzt. Dabei kann der Datenaustausch mit weiteren Softwaresystemen über direkt implementierte Schnittstellen oder über Datenbanken wie „InfluxDB“ zur indirekten Kopplung erfolgen. Der konzeptionelle Aufbau eines prototypischen empathischen digitalen Zwillings des Menschen ist in **Bild 2** illustriert. Eine Anbindung an eine Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS) ist vorgesehen und Teil künftiger Arbeiten zur Vernetzung digitaler Zwillinge.

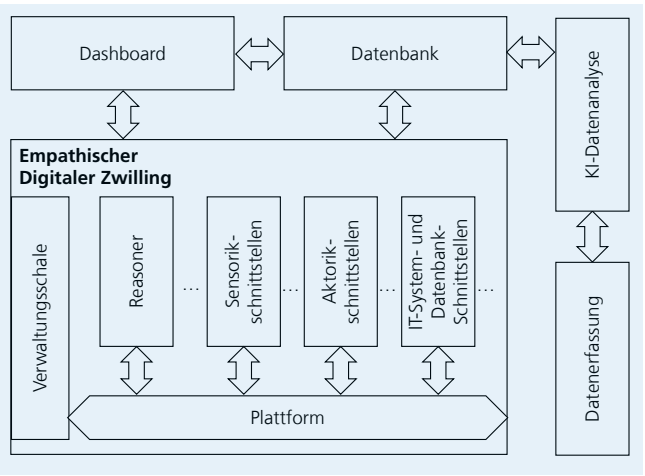

Bild 2. Digitaler Zwilling im Kontext des Schraubassistenzsystems. *Grafik: Fraunhofer IAO*

3.2 Digitales Montageassistenzsystem

Das digitale Emotion-Assistenzsystem wird an einem manuell betriebenen, zu Demonstrationszwecken konstruierten Montagearbeitsplatz eingesetzt, an dem Schraubverbindungen ein herausforderndes Szenario für die Mitarbeitenden darstellen. Durch die Anwendung soll ein Szenario abgebildet werden, in welchem die Mitarbeitenden effektiv befähigt werden, Montageaufgaben eigenständig und korrekt durchzuführen, während ein KI-System als unterstützende Technologie die Qualitätsprüfung übernimmt, etwa bei der Auswahl der richtigen Schraube und der korrekten Haltung. Die Basis der KI-Technologie bilden Algorithmen des unüberwachten maschinellen Lernens, etwa die Clusterverfahren „K-Means“ und „DBSCAN-“, die Schraubdaten in Form von Drehmomenten oder Winkel- über Zeitwerte analysieren, um in einer ersten Trainingsinstanz inhärente Merkmale der Schraubqualität zu extrahieren.

Das digitale Assistenzsystem soll anschließend während des simulierten Montagevorgangs kontinuierlich Feedback und Verbesserungsvorschläge liefern und so veranschaulichen, wie KI die menschliche Arbeit unterstützen kann. Der komplementäre Charakter des KI-Assistenzsystems zeigt sich insbesondere in seiner Fähigkeit, die Prozessqualität und Effizienz zu steigern, etwa durch ein optimiertes Fehlermanagement. Dieser Aspekt wird durch eine präzisere Klassifikation von Schraubfällen mittels überwachtem maschinellen Lernen als Ergänzung zu den Clusteralgorithmen in einer zweiten Testinstanz abgedeckt, was zu bes-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -

Bild 3. Prototyp in „Arena2036“. *Fotos: Fraunhofer IAO*

seren Qualitätsergebnisse als jene bisheriger Qualitätsregelkarten aus der Industrie führt.

Das gewählte Szenario findet in einem Produktionsumfeld statt, sodass die Probanden gezielt aus diesen Bereichen stammen. Das Setting wird möglichst realitätsnah an den täglichen Arbeitsablauf der Mitarbeitenden angepasst, um den tatsächlichen Einfluss der entwickelten Assistenz auf die Ergebnisse abzubilden. So kann erforscht werden, inwieweit die Integration von KI in bestehende Arbeitsprozesse gelingt, ohne den Arbeitsfluss zu stören. Auch das Feedback der Probanden wird genutzt, um Akzeptanzaspekte – sowohl bei der Gestaltung als auch bei der technischen Ausführung – zu analysieren und validieren sowie entsprechende Schulungsmaßnahmen abzuleiten. Dies erfolgt durch Befragungen am Ende der Testabläufe sowie durch direktes, unstrukturiertes Feedback unmittelbar nach der Nutzung des Demonstrators. In einem kontinuierlichen Zyklus wird das digitale Montageassistenzsystem entsprechend optimiert. Die einzelnen Elemente werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

4 Demonstrator

Der Demonstrator umfasst einen vernetzten Nexo-Funk-Akkuschrauber von Bosch Rexroth, welcher in der Lage ist, fortlaufend Prozessdaten in Form von Drehmomenten und Drehwinkeln in Echtzeit zu erfassen und im JavaScript Object Notation (JSON)-Format bereitzustellen. Diese Daten werden an das vorab trainierte Clustering-Modell übertragen, das sie dann in vordefinierte Kategorien einteilt. Anhand der charakteristischen Messkurven werden die Schraubenart, die Anzahl der Verschraubungen sowie der Einsatz von Unterlegscheiben bestimmt. Das System erkennt, basierend auf zuvor definierten, eindeutigen

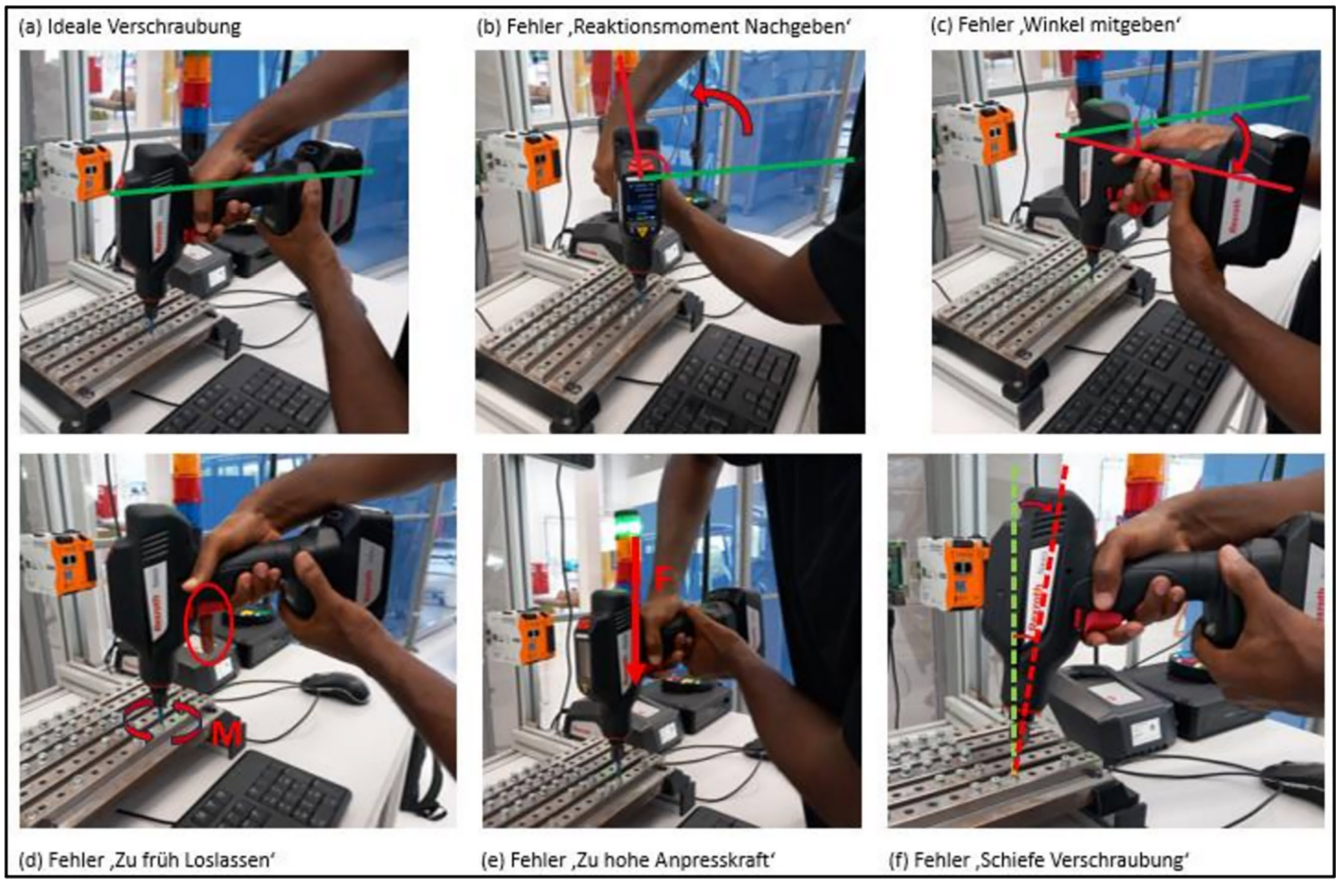

Bild 4. Durchführung einer gezielt fehlerbehafteten Messreihe. *Fotos: Fraunhofer IAO*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

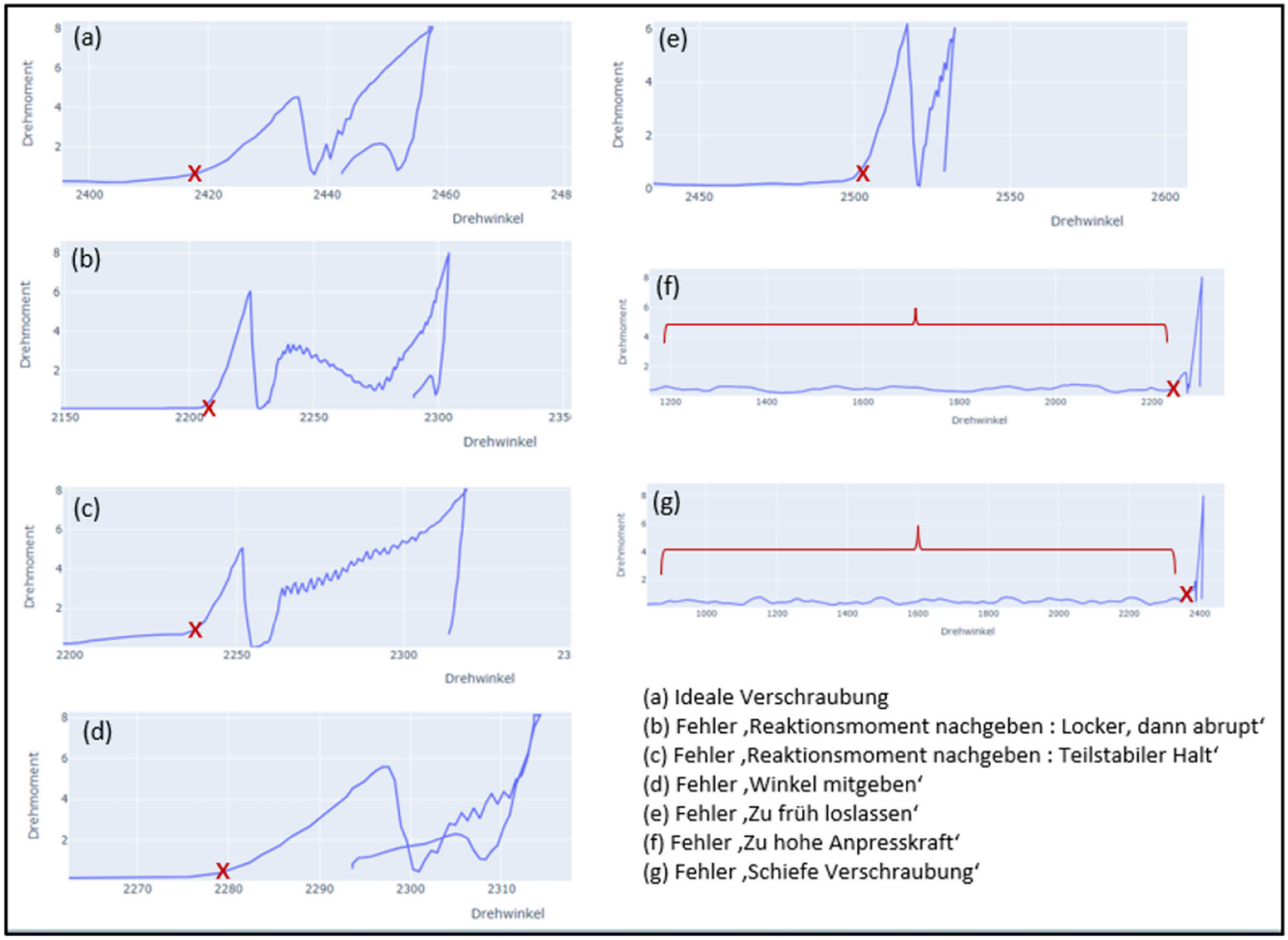

Bild 5. Drehmoment-Drehwinkel-Kurven für fehlerhafte Schraubungen. *Grafik: Fraunhofer IAO*

Klassen, Abweichungen wie zu langsames oder fehlerhaftes Einschrauben, den Einsatz mangelhafter Schrauben oder das Fehlen oder unsachgemäße Anbringen von Unterlegscheiben. Daraufhin liefert das Assistenzsystem konkrete Hinweise und Korrekturanweisungen.

Für die Verschraubung wurden Innensechskantschrauben mit einheitlichem Gewindemaß und Längen genutzt. Der Arbeitsplatz ist ein Stehtischarbeitsplatz, auf einem Bildschirm können in ergonomischer Kopfhöhe bei Bedarf die Schraubkurven in Echtzeit angezeigt werden. Die Ergebnisse und Handlungsempfehlungen können aber auch über weitere Bedienoberflächen in Tablets dargestellt werden.

Im Fehlerfall liefert das System eine visuelle Rückmeldung über das Display. Zusätzlich ermöglichen die inhärenten Merkmale der Prozessdaten Rückschlüsse auf potenziell fehlerverursachende Zustände des Montagearbeiters. So wird jeder Fehlerart ein spezifischer Emotionszustand, etwa Nervosität, Müdigkeit oder Aufregung, zugeordnet, basierend auf Daten aus dem Modell des digitalen Zwillings, beispielsweise der erfassten Pose. Eine Signallampe zeigt dem Mitarbeitenden außerdem mittels breit gefächerter Farbcodierung seinen aktuellen emotionalen Zustand an und leitet Handlungsempfehlungen ab, etwa Pausenvorschläge.

Um ein konsistentes Datenmodell für Mensch, Maschine, Produkt und Fabrik zu erstellen, wurde zunächst der Fokus auf das Themenfeld „Fehlerarten und Emotionszustände in der manuellen Montage" gelegt. Der Prototyp für einen beispielhaften manuellen Schraubvorgang inklusive Fehlererkennung wurde fertig aufgebaut in der „Arena2036" und ist in **Bild 3** dargestellt.

Der Funk-Akkuschrauber stellt die Prozessdaten in Echtzeit in JSON bereit. Über einen Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)-Broker, einer Raspberry-Pi 5 B mit 16 GB RAM, sowie Anwendungen zur Datenspeicherung und Visualisierung wie „InfluxDB" von InfluxData und „Grafana" konnten Schraubprozesse in Echtzeit auf Fehler klassifiziert werden. Eine Signallampe der Firma Werma wurde installiert, um je nach Fehlerart visuelles Feedback an den Nutzer zu geben.

Zur Analyse der Typologie menschlicher Fähigkeiten und Zustände in Produktionsumgebung wurden die Fehlerarten in der Produktion anhand einer Literaturrecherche eingegrenzt. Dann wurden unter kontrollierter Umgebung mehrfach Datensätze pro vordefinierter Fehlerart absichtlich produziert, um diese später von Maschinelles Lernen-Algorithmen identifizieren zu lassen und die Genauigkeit des Assistenzsystems zu prüfen, siehe **Bild 4**. Die final definierten Schraubsituationen gingen von der „idealen" Verschraubung über die Fehler „Reaktionsmoment nachgeben", „Winkel mitgeben", „zu früh loslassen" bis zu „zu hohe Anpresskraft" und „schiefe Verschraubung".

Die Modellierung der Daten erfolgte im nächsten Schritt durch Extraktion der jeweiligen Drehmoment-Drehwinkel-Kurven pro Verschraubungsfall und anschließender Merkmalsselekti-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

on und -extraktion zur Anwendung von Maschinelles-Lernen-Algorithmen, auszugsweise dargestellt in **Bild 5**.

Die charakteristischen Merkmale der fehlerbehafteten Schraubverläufe konnten somit den Fehlerarten zugeordnet werden. Abschließend erfolgten das Clustern und die Klassifikation der Fehler mit sehr guten Treffquote-Ergebnissen. So kann am Demonstrator nach jedem Schraubvorgang vorhergesagt werden, welcher Schraubfall vorliegt. Aktuell erfolgt der Datentransfer zwischen Schraubfallanalyse und digitalem Zwilling über die Datenbank InfluxDB, sodass Daten beider Perspektiven integriert ausgewertet werden können. Es gilt im nächsten Schritt noch eine Ableitung der jeweiligen Emotion beziehungsweise des arbeitsbezogenen Zustands des Menschen in Abhängigkeit der erkannten Fehler durchzuführen und die Teilsysteme weiter zu integrieren. Aktuell können sowohl die Schraubanalysedaten als auch Daten aus dem digitalen Zwilling des Menschen in einem Dashboard dargestellt und damit Anwenderfeedback gegeben werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Neue Ansätze zur Unterstützung des Menschen in der manuellen Montage sind erforderlich. Auf der Grundlage empathischer technischer Systeme wie empathischer digitaler Zwillinge werden neue Assistenzsysteme zur Unterstützung möglich. Sie erlauben es, durch integrierte Betrachtung mehrerer Perspektiven von Zustand und Verhalten des Menschen, wie seiner Pose und seinen Schraubvorgängen, eine situations- und personenbezogene Unterstützung zu realisieren.

Der erreichte Stand der Arbeiten zur Realisierung eines empathischen Assistenzsystems für manuelle Schraubvorgänge im Fraunhofer-Leitprojekt Emotion wird weiterentwickelt, um Softwarebausteine, Sensorik und Aktorik an das vorhandene System anzuschließen, dieses weiter zu integrieren sowie die Vernetzung digitaler Zwillinge zu unterstützen. Ein Schwerpunkt der Arbeiten ist die Stärkung der empathischen Aspekte des Systems, vor allem in Bezug auf seine Re-/Aktionen. Zudem ist geplant, den Demonstrator in einer Studie in Bezug auf seine Benutzerakzeptanz sowie auf die durch ihn erzielte Prozessverbesserung hin zu untersuchen.

FÖRDERHINWEIS

Die beschriebenen Arbeiten wurden im Fraunhofer-Leitprojekt „EMOTION – Empathische technische Systeme für die resiliente Produktion“ durchgeführt.

LITERATUR

[1] Uhlmann, E.: Herausforderungen und Perspektiven der industriellen Fertigung. WT Werkstattstechnik 114 (2024) 0708, S. 384, doi.org/10.37544/1436–4980–2024–07–08–1
[2] Riedel, O.: Wir brauchen den Menschen in der Fabrik! Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 119 (2024) 6, S. 393, doi.org/10.1515/zwf-2024–2009. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
[3] Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Empathische technische Systeme für die resiliente Produktion – EMOTION. Stand: 2025. Internet: www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-initiativen/fraunhofer-leitprojekte/emotion.html. Zugriff am 17.04.2025
[4] Kuhn, T.: Digitaler Zwilling. Informatik-Spektrum 40 (2017), S. 440–444, doi.org/10.1007/s00287–017–1061–2
[5] Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C. et al.: Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access 8 (2020), pp. 108952–108971, doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358
[6] Lin, Y.; Chen, L.; Ali, A. et al.: Human digital twin: a survey. Journal of Cloud Computing 13 (2024), 131, doi.org/10.1186/s13677–024–00691-z
[7] Qi, Q.; Tao, F; Hu, T. et al.: Enabling technologies and tools for digital twin. Journal of Manufacturing Systems 58, Part B (2021) pp. 3–21, doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001
[8] Li, X.; He, B.; Wang, Z. et al.: Toward Cognitive Digital Twin System of Human–Robot Collaboration Manipulation. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 22 (2025), pp. pp. 6677–6690, doi.org/10.1109/TASE.2024.3452149
[9] D'Amico, R. D.; Sarkar, A.; Karray, M. H. et al.: Knowledge transfer in Digital Twins: The methodology to develop Cognitive Digital Twins. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 52 (2024), pp. 366–385, doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.06.007
[10] Davila-Gonzalez, S.; Martin, S.: Human Digital Twin in Industry 5.0: A Holistic Approach to Worker Safety and Well-Being through Advanced AI and Emotional Analytics. Sensors 24 (2024) 2, #655, www.mdpi.com/1424–8220/24/2/655#
[11] Li, X.; He, B.; Wang, Z. et al.: Toward Cognitive Digital Twin System of Human–Robot Collaboration Manipulation. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 22 (2025), pp. 6677–6690, DOI: doi.org/10.1109/TASE.2024.3452149
[12] Spillner, R.: Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leitungswandlungen in der Produktion. Dissertation, TU München 2014
[13] Aehnelt, M., Bader, S.: Mobile Informationsassistenz für die Montage. In: Weidner, R. (Hrsg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität 2014, S. 370–380
[14] Bengler, K., Lock, C., Teubner, S. et al.: Grundlegende Konzepte und Modelle. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. München: Hanser 2017, S. 54–60
[15] Merazzi, J., Friedel, A.: Einteilung und Bewertung von Montageassistenzsystemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 6, S. 413–416
[16] Pokorni, B., Zwerina, J., Hämmerle, M.: Human-centered design approach for manufacturing assistance systems based on Design Sprints. Procedia CIRP 91 (2020), pp. 312–318, doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.181
[17] Fairsharing Team: Quantities, Units, Dimensions, and Types. Stand: 2025. Internet: doi.org/10.25504/FAIRsharing.d3pqw7. Zugriff am 17.04.2025
[18] Kim, W.; Sung, J.; Saakes, D. et al.: Ergonomic postural assessment using a new open-source human pose estimation technology (OpenPose). International Journal of Industrial Ergonomics 84 (2021), #103164, doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103164
[19] McAtamney, L.; Corlett, N.: RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics 24 (1993) 2, pp. 91–99, doi.org/10.1016/0003–6870(93)90080-S

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Christian Oswaldo Saba Gayoso, M.Sc.
christian-oswaldo.saba-gayoso@iao.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-2186

Matthias Lück, M.Sc.
matthias.lueck@iao.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Joachim Lentes
joachim.lentes@iao.fraunhofer.de

Univ.-Prof. Dr.rer.oec. Katharina Hölzle

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.iao.fraunhofer.de

Univ.-Prof. Dr.rer.oec. Katharina Hölzle

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart
www.iat.uni-stuttgart.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-100 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -